

# **SPECIFICATION**

## **TITLE OF THE INVENTION**

### **RAPID DEPTH SCANNING OPTICAL IMAGING DEVICE**

This application claims benefit of Japanese Application No.Hei 11-256294 filed in Japan on Sep. 9,1999, and Japanese Application No.2000-78743 filed in Japan on Mar.21,2000,and Japanese Application No.2000-154417 filed in Japan on May 22,2000,the contents of which are incorporated by this reference.

## **BACKGROUND OF THE INVENTION**

### *1. Field of the Invention*

本発明は、被検体に低干渉性光を照射し、被検体において散乱した光の情報から被検体の断層像を構築する光イメージング装置に関する。

### *2. Related Art Statement*

近年、生体組織の病変を診断するため、組織内部情報を光学的手法により検出・画像化する装置として、低干渉光を用い、組織内部を断層像画像を構築するOCT（オプティカル・コヒーレント・トモグラフィ）が、例えばUSP 5 4 5 9 5 7 0、WO 9 8 / 5 2 0 2 1に提案されている。

上記USP 5 4 5 9 5 7 0においては、生体組織の特定の深さからの散乱・反射光を検出するため、リファレンスミラーを進退することにより得ている。さらに、生体組織内部の断層画像を構築するため、生体組織に照射する光ビームを走査し、前記リファレンスミラーの進退とを同期することで断層像を構築している。

一方、WO 9 8 / 5 2 0 2 1には、数十KHzで駆動可能なOCT装置が提案されている。WO 9 8 / 5 2 0 2 1においては、生体組織の特定の深さからの散乱・反射光を検出するため、光ビームを回折格子等によりスペクトル分解するとともに、ガルバノミラーやAOM（音響光学変調素子：Acoustic Optical Modulation）等で光ビームを走査することでリファレンス光の位相及び群速度を変化させる方法が示されている。

しかしながら、前記USP 5 4 5 9 5 7 0においては、比較的重量が重いリファレンスミラーを5mm程度進退させるため、その駆動は数十Hz程度に制限される。このため、連続した動画像を得ることができず、生体組織を診断する場合には心拍等の動き

により像のぶれ等による画質劣化の問題がある。

マイケルソン干渉系を用いた場合、光カプラーの分岐比が1 : 1 が最大の効率となるので、光源出力をPとし、被検体からの反射率をRとすると検出器に戻る光は $P \times R / 4$ となる。参照側から検出器に戻る光量はミラーの反射率を1とすると $P / 4$ となる。ここで検出器に戻る光量は $(P \times R / 4 + P / 4)$ である。しかし検出したい信号光は光ヘテロダイン検出のため、 $\sqrt{(P \times R / 4 \times P / 4)} = P \sqrt{(R / 4)}$ となり、生体では一般的に $R \approx 10^{-4}$ 以下であるので、検出器に戻る光量に対し、信号が圧倒的に小さくなり、SN比を向上させることが困難である。また、生体からの微弱な反射光のうち75%を捨てていることになり、これもSN比を減衰する原因となる。

そのため、マイケルソン干渉系を用いてSN比を向上させる方法として、USP 3 565 335では、参照側に減衰器を設け、信号光と同程度まで減衰させることで、検出器に戻る光量を調整する方法を開示している。しかし、同時にヘテロダイン検出光も減衰してしまうという問題がある。USP 3 565 335では、原理的にマイケルソン干渉系より優れた方式としてマッハツエンダー干渉系の例を開示している。しかし、ここで示されるマッハツエンダー干渉系は光路長可変手段としてコーナーミラーの移動で行う方法を示しているが、この方法では高速に深さ方向の走査を行い、リアルタイムでの観察を行うことは困難である。

さらにマイケルソン干渉系では、光源に光源光が参照側から最大1/4戻ってくる。このような戻り光はSLD（スーパーミネセンスダイオード）などの低コヒーレンス光源を破壊する原因になり、光通信波長帯（1.3, 1.55  $\mu\text{m}$ ）以外の帯域では高価なアイソレータなどを通常用いる必要があるという問題がある。

さらに、ファイバを用いたマイケルソン干渉系では、最大の干渉出力を得るには物体側と参照側の偏光を偏波コントローラなどを用いて一致させることが重要である。しかし、“In vivo video rate optical coherence tomography” (A. M. Rollins et. al Optics Express vol. 3, No. 6, P219, 1998) に示されるような反射型の高速光デレイラインでは、回折格子などの偏光特性を有するデバイスを用いた場合、入射ファイバと出射ファイバが同一のファイバなので、参照側、物体側、更に両方に設けられた偏光コントローラの調整によっても、参照側の光効率の高さと、参照側と物体

側の偏光特性の一致が両立するとは限らず、低干渉出力しか得られない可能性を有する。

さらに、反射型の高速度ダイレイラインでは、可動ミラー以外のファイバ端や光学素子表面の反射も戻り光となるため、得たい信号光以外のノイズ光が発生し、S/N比を劣化させる原因となる。

また、リファレンスアームにおいては、光ビームに対しミラーを高速に変位させることで、位相及び群速度を変化している。この時、位相変化によりドップラシフトが発生するので、光検出器で受光した信号を光ヘテロダイン検波することで、干渉信号を高感度に検出できる。

しかし、ガルバノミラー等を高速に変位させるためには、サイン関数で駆動する必要がある。この場合のドップラシフト量はその微分値であるコサイン関数で変位し、さらに光ヘテロダイン検波周波数が変動するため、S/Nが低下するあるいは、変位の少ない部分のみを検波するので効率が悪くなるなどの問題があった。

## OBJECT AND SUMMARY OF THE INVENTION

この発明の目的は、高S/Nで高速なリファレンス走査手段を有すると共に、干渉系を安価に構成することのできる光イメージング装置を提供することである。

本発明の光イメージング装置は、

被検体に低コヒーレンス光を照射して得られる反射・散乱光によって、前記被検体の断層像を構築するため前記低コヒーレンス光を供給する光源と、

前記光源からの前記低コヒーレンス光を前記被検体に照射すると共に前記被検体からの反射・散乱光を受光し、また受光・照射方向を少なくとも1次元的に走査可能な第1の光走査部を有する光照射受光部と、

前記光照射受光部に前記低コヒーレンス光を前記被検体に導光すると共に前記被検体からの反射・散乱光を導光する第1の光路部と、

低コヒーレンス光を導光する第2の光路部と、

光源と前記第1の光走査部の中途に設けられ前記光源からの前記低コヒーレンス光を第1の光走査部と、第2の光路部に分離する第1の光分離部と、

前記第1の光走査部の中途に設けられ前記被検体からの反射・散乱光を前記第1の光走査部から分離する第2の光分離部と、

前記光分離部により分離された前記低コヒーレンス光を導光する第2の光路部と、

前記第2の光分離部により分離された前記反射散乱光を導光する第3の光路部と、  
前記第2の光路部の前記低コヒーレンス光と前記第3の光路部の反射・散乱光を結合して干渉させる結合部と、

前記結合部による干渉を干渉信号として検出する検出部と

前記第2または第3の光路部の一方に設けられ、独立した入射光路および出射光路および前記入射光路および前記出射光路の間に設けられた光透過光学素子により、光路の少なくとも位相遅延量または群遅延量の一方を可変することにより前記干渉位置を光軸に対し軸方向に走査する光路長可変部と、

前記検出部により検出された前記干渉信号を信号処理して前記被検体の断層像を生成する画像生成部と、

を備えて構成される。

本発明のその他の特徴及び利益は、次の説明を以て十分明白になるであろう。

## BRIEF DESCRIPTION OF THE DRAWINGS

図1ないし図9は第1実施例に係わり、図1は光イメージング装置の構成を示す構成図、図2は光走査プローブ及び回転駆動装置の構成を示す構成図、図3は光路長可変光学系の概略構成図、図4Aは光路長可変光学系を構成するクサビ形状プリズムの配置及び動きを示す第1の説明図、図4Bは光路長可変光学系を構成するクサビ形状プリズムの配置及び動きを示す第2の説明図、図4Cは光路長可変光学系を構成するクサビ形状プリズムの配置及び動きを示す第3の説明図、図4Dは光路長可変光学系を構成するクサビ形状プリズムの配置及び動きを示す第4の説明図、図5はクサビ形状プリズムを中心波長の光が通るときの群遅延距離及び干渉信号のビート周波数の時間経過の一例を示すグラフ、図6はクサビ形状プリズムの第1の例を示す図、図7はクサビ形状プリズムの第2の例を示す図、図8はクサビ形状プリズムの回転手段を説明する図、図9はクサビ形状プリズムの回転手段の変形例を説明する図である。

図10ないし図14は第2実施例に係わり、図10は光路長可変光学系における第2の回折格子より後ろ側の光学要素を示す概略構成図、図11はクサビ形状プリズムの回転に伴い第2の回折格子から射出された光が楕円運動をする状態を示す説明図、図12Aは2つのコーンレンズの距離が近いときのコーンレンズを通過する光の経路を示す説明図、図12Bは2つのコーンレンズの距離が離れているときのコーンレンズを通過



する光の経路を示す説明図、図13は2つのコーンレンズの間の距離に対する、楕円運動をする光の、コーンレンズ通過後のyz平面と平行な方向およびx軸と平行な方向の径を示すグラフ、図14はコーンレンズの変形例を示す説明図である。

図15ないし図17は第3実施例に係わり、図15は光路長可変光学系の概略構成図、図16は光路長可変光学系の要部説明図、図17は2枚のガラスのなす角度 $\phi$ が変化したときの第2の回折格子から射出される光の状態を示す説明図である。

図18Aないし図19Bは第4実施例に係わり、図18Aは光路長可変光学系における第2の回折格子より後ろ側の光学要素の構成を第2軸から見た図、図18Bは光路長可変光学系における第2の回折格子より後ろ側の光学要素の構成を第1軸から見た図、図19Aは光取り出し部のファイバ端での光のスポット形状及びファイバのモードフィールド径の大きさを示す第1の説明図、図19Bは光取り出し部のファイバ端での光のスポット形状及びファイバのモードフィールド径の大きさを示す第2の説明図である。

図20ないし図23は第5実施例に係わり、図20は光路長可変光学系の概略構成図、図21は光路長可変光学系の要部説明図、図22は第1の回折格子に対する前側のプリズムの傾き角を変化させたときの前側のプリズムに入射する光の位置に関する位相の傾き量を示すグラフ、図23は光路長可変光学系の変形例を示す概略構成図である。

図24ないし図26は第6実施例に係わり、図24は本実施例の光路長可変光学系を用いた光断層構造観測装置のシステム図、図25は本実施例の光路長可変光学系の概略構成図、図26は本実施例の光路長可変光学系を構成するクサビ形状プリズムの配置を示す説明図である。

図27ないし図34は第7実施例に係わり、図27は光路長可変光学系の構成を示す構成図、図28は光走査手段を説明する構成図、図29は光路長可変光学系の動作を説明する第1の説明図、図30Aは光路長可変光学系の動作を説明する第2の説明図、図30Bは光路長可変光学系の動作を説明する第3の説明図、図31は光走査手段の第1の変形例を示す構成図、図32Aは光走査手段の第2の変形例を示す第1の図、図32Bは光走査手段の第2の変形例を示す第2の図、図32Cは光走査手段の第2の変形例を示す第3の図、図33は光路長可変光学系の第1の変形例を示す構成図、図34は光学ブロックを説明する構成図である。

図35Aないし図37は第8実施例に係わり、図35Aは光路長可変光学系の構成

を示す第1の図、図35Bは光路長可変光学系の構成を示す第2の図、図36は回転ディスクを説明する構成図、図37は回転ディスクの変形例を示す構成図である。

図38ないし図41は第9実施例に係わり、図38は光路長可変光学系の構成を示す構成図、図39は回転ディスクを説明する説明図、図40は回転ディスクの第1の変形例を説明する説明図、図41は回転ディスクの第2の変形例を説明する説明図である。

図42ないし図44は第10実施例に係わり、図42は光路長可変光学系の構成を示す図、図43は光路長可変光学系の変形例の構成を示す図、図44は光路長可変光学系の変形例の詳細な構成を説明する図である。

図45は第11実施例に係る光路長可変光学系の構成を示す図である。

図46ないし図51は第12実施例に係わり、図46は光カプラ、光走査プローブ、走査手段及び走査駆動装置の詳細な構成を説明する図、図47はコネクタの接点部（プローブ側）の構成を示す図、図48は治療用およびマーキング用のレーザダイオード（LD）によるOCT画像中のターゲットにレーザ治療・マーキングを行なう方法を説明する図、図49は治療用およびマーキング用のレーザダイオード（LD）によるOCT画像中のターゲットにレーザ治療・マーキングを行なう方法の流れを示すフローチャート、図50は光路長可変光学系により光伝播時間を変化させながら被検体の深さ方向に対応して得られた干渉信号を復調器で復調しADコンバータでコンピュータに取り込まれた信号の信号強度を示す図、図51は特に生体で効果的に図50の信号強度を補償する方法を示す図である。

図52は第13実施例に係る光走査プローブ及び走査手段の構成を示す図である。

図53ないし図55は第14実施例に係わり、図53は光走査プローブ及び走査手段の構成を示す図、図54は走査手段の変形例の構成を示す図、図55はGRINレンズを光軸方向から見た図である。

図56及び図57は第15実施例に係わり、図56は光走査プローブ及び走査手段の構成を示す図、図57は図56のA-A線断面を示す断面図である。

図58ないし図62は第16実施例に係わり、図58は光イメージング装置の要部の構成を示す構成図、図59は光走査プローブの第1の変形例を説明する図、図60は光走査プローブの第2の変形例を説明する図、図61は光走査プローブの第3の変形例を説明する図、図62は固定ミラーを含む光軸に沿った断面を示す断面図である。

図6 3ないし図6 8は第17実施例に係わり、図6 3は光イメージング装置の構成を示す構成図、図6 4は光イメージング装置に用いられる光走査プローブの先端の光学系の構成を示す図、図6 5は光イメージング装置に用いられる光走査プローブの先端の光学系の変形例の構成を示す図、図6 6は2つの低コヒーレンス光源を合波し光源のスペクトル幅を拡大する構成を示す図、図6 7は2つの低コヒーレンス光源を合波し最終的にガウシアン分布を得るための構成を示す図、図6 8は光源の合波を更に高効率で実現する例に説明する図である。

図6 9ないし図7 1は第18実施例に係わり、図6 9は光走査プローブの先端光学系の構成を示す図、図7 0は光走査プローブの先端光学系の第1の変形例の構成を示す図、図7 1は光走査プローブの先端光学系の第2の変形例の構成を示す図である。

図7 2ないし図7 4は第19実施例に係わり、図7 2は光イメージング装置の光学系の要部の構成を示す構成図、図7 3は光学系の第1の変形例を示す図、図7 4は光学系の第2の変形例を示す図である。

図7 5ないし図7 7は第20実施例に係わり、図7 5は光走査プローブ、光走査手段及び参照光路の光伝播時間変化手段を内視鏡先端部に組込んだ光イメージング装置の構成を示す図、図7 6はディスクの構成を示す図、図7 7はディスクによる横方向－深さ方向の2次元画像を説明する図である。

## DATAILED DESCRIPTION OF THE PREFERRED EMBODIMENTS

### 第1実施例：

#### (構成)

図1に示される光イメージング装置は、Super Luminescent Diode (SLD) 等の低コヒーレンス光源1を有している。この低コヒーレンス光源1の光は、その波長が例えば1300nmで、その可干渉距離(コヒーレンス長)が例えば15 $\mu$ m程度であるような短い距離範囲のみで干渉する低コヒーレンス性を有している。つまり、この光を例えば2つに分岐した際、再び混合した場合には、分岐した点から混合した点までの2つの光路長の差が15 $\mu$ m程度である場合にのみ干渉するという特性を示す。

低コヒーレンス光源1からの光は第1のシングルモードファイバ(以下SMF) 2

に導光され、光カプラ3により第2のSMF 4と第3のSMF 5に分岐される。この光カプラ3は第1のSMF 2の光を第2のSMF 4と第3のSMF 5に $(1-\alpha) : \alpha$ の比率で分岐する。第3のSMF 5に導光された光は光カプラ6により略半分が第5のSMF 2 1 aに導光され、走査手段19を経由し、第5のSMF 2 1 bの他端に伝送される。第5のSMF 2 1 bに導光された光は、光走査プローブ20に伝送され、光走査プローブ20先端部から生体組織162に出射し、生体組織162からの反射光の一部が再び光走査プローブ20に戻り、戻り光は第5のSMF 2 1 b、2 1 aを通して再び光カプラ6により分岐され、第4のSMF 13に導光される。

また、第2のSMF 4に導光された光は偏波面コントローラ（以下PC）7を通り、入射SMF 8を経由して光路長可変光学系9に導光される。光路長可変光学系9は入射SMF 8から出射SMF 10までの光路より生じる光遅延時間を制御回路26により制御可能なものである。光路長可変光学系9を通過し出射SMF 10に導光された光はPC 11を通して第6のSMF 12に導光される。第4のSMF 13と第6のSMF 12に導光された光は光カプラ14によって略均等にSMF 15とSMF 16に分岐されそれぞれフォトダイオードなどで構成されるディテクタ17とディテクタ18に入力され、光強度が検知される。ディテクタ17とディテクタ18で得られた光信号は差動アンプ23により増幅される。差動アンプ23ではディテクタ17の出力とディテクタ18の出力を差分し、増幅するため、干渉信号は2倍に増幅され、それ以外の同相光雑音はキャンセルされる。差動アンプ23の出力は、復調器24により復調されADコンバータ25によりデジタル化されコンピュータ27に取り込まれる。

また、走査手段19は走査駆動装置22によって光走査プローブの生体に対する光の出入射位置258を走査することができる。

図2に図1の光イメージング装置の変形例を示す。図1と同一の構成には同じ番号を付け、図1と相違する部分のみ説明する。

低コヒーレンス光源1からの光は第1のSMF 2に導光され、光カプラ3により第2のSMF 4と第5のSMF 2 1 aに分岐される。第3のSMF 5に導光した光は走査手段19を経由し、光走査プローブ20に伝送され、生体組織からの反射光の一部が光走査プローブ20に戻り、走査手段19、第5のSMF 2 1 aを通して光カプラ3により分岐され、第3のSMF 5に導光される。

また、第3のSMF 5に導光した光は位相変調手段k 20を通り第4のSMFに導光される。また、第2のSMF 4に導光された光は偏波面コントローラ7を通り入射SMF 8を通して光路長可変光学系9に導光され、第6のSMF 12に導光される。第4のSMF 13と第6のSMF 12に導光された光は略均等にSMF 15とSMF 16に分岐されてディテクタ17, 18に入力され、復調器24, ADコンバータ25を含む信号処理装置により干渉信号が処理される。後は図1の説明と同様である。図2の構成では光カプラが1つで済むため安く製作できるという特徴がある。

本発明の実施例の説明に先立ち、光路長可変光学系の原理について説明する。

本発明は、以下のフーリエ変換の性質を光学系に応用したものである。

時間的に変化する関数 $x(t)$ があり、それをフーリエ変換して、角振動数領域 $\omega$ で表現したものを $X(\omega)$ とする。

$$x(t) \Leftrightarrow X(\omega)$$

$X(\omega)$ に対して、位相を角振動数に対して傾き $T_g$ で線形に変調をかけると次のようになる。

$$X(\omega) \cdot \exp(-i\omega T_g)$$

ただし、 $i$ は虚数単位である。

これを逆フーリエ変換すると、時間領域では、

$$x(t - T_g)$$

となる。

すなわち、ある時間的に変化する信号をフーリエ変換し、角振動数成分に対して傾き $-T_g$ で線形に位相変調をかけると変調された信号は実時間では $T_g$ 遅れることを示している。

本発明は、光路長可変光学系に入射した光を角振動数の成分に分散した後、角振動数に対して線形に位相変調をかけるときに位相変調量の傾き $T_g$ を時間的に変化させることで、光路長可変光学系から射出される光の信号の時間的遅延量（群遅延時間という）を変化させるという原理を使っている。

群遅延時間 $T_g$ を距離に換算した値 $c \cdot T_g$ （但し、 $c$ は真空中の光の速度）を群遅延距離 $L_g$ というが、群遅延距離 $L_g$ の時間的な変化は、OCTシステムにおいてはサンプル側の干渉位置をスキャンしていることに相当する。

この光断層構造観測装置に用いられる本実施例の光路長可変光学系31は、図3に示すように、入射シングルモードファイバ（以下、入射SMF）8と正のパワーを持つ第3の正レンズh2とからなる光導入部h3と、光のスペクトルを空間的に分散させるスペクトル分散要素である第1の回折格子h4と正のパワーを持つ第1の正レンズh5とのペアと、前記スペクトル分散要素で分散させられた光を角振動数に対して略線形に位相を変化させる位相変調素子であるクサビ形状プリズムh6と、前記位相変調をかけられかつ空間的に分散させられた光を1つの光路に統一させるスペクトル統一要素である正のパワーを持つ第2の正レンズh7と第2の回折格子h8とのペアと、正のパワーを持つ第4の正レンズh9と出射シングルモードファイバ（以下、出射SMF）10とからなる光取り出し部h11とで構成され、これらの光学要素が光学的に接続されている。

クサビ形状プリズムh6は、光を透過する素材であるガラスでできている。

また本実施例では、第1の正レンズh5と第2の正レンズh7には、焦点距離が同じレンズが使用されており、かつ、第1の正レンズh5と第2の正レンズh7は、光軸が一致するように配置されている。また、第1の回折格子h4は、第1の正レンズh3の前側焦点位置に、クサビ形状プリズムh6は第1の正レンズh5の後側焦点と第2の正レンズh7の前側焦点位置に、第2の回折格子h8は第2の正レンズh7の後側焦点位置にほぼ一致するように、それぞれ配置されている。

また、クサビ形状プリズムh6は、光の進行方向に対して略平行な方向を軸として回転可能に設けられている。クサビ形状プリズムh6の回転軸は、光導入部h3から導入される光の中心波長の光が通る位置からずれて位置している。

ここで、本実施例の光路長可変光学系9の座標系を次のように定義しておく。クサビ状のプリズムh6の回転軸をz軸とする。また、回折格子h4、h8の格子の方向（回折格子の格子が切っただけある方向）をx軸、x軸とz軸に垂直な方向をy軸とする。なお、このとき、第1の正レンズh5および第2の正レンズh7の光軸は、z軸方向と平行にセッティングされているものとする。

また、クサビ形状プリズムh6の向きは、クサビ形状プリズムh6を回転させたときにクサビ形状プリズムh6の前側の面の法線単位ベクトルN1および後側の面の法線単位ベクトルN2のxy平面側への正射影のベクトルP1、P2の絶対値が変化しない

ようにする。

但し、法線単位ベクトル  $N_1$ 、 $N_2$  は、 $z$  軸とクサビ形状プリズム  $h_6$  の前側または後ろ側の面との交点を基点として、ベクトル  $N_1$  又は  $N_2$  と光の進行方向とのなす角度が鋭角になる方向に取ることとする。

具体的には、クサビ形状プリズム  $h_6$  の配置と動きは、図 4 A～図 4 D に示すようになる。図 4 B 中の実線で書かれた部分はある時刻に  $z$  軸方向からみたクサビ形状プリズム  $h_6$ 、図 4 A は図 4 B と同じ時刻に  $x$  軸方向からみたクサビ形状プリズム  $h_6$  を示している。

図 4 A の状態より少し時間が経過すると、クサビ形状プリズム  $h_6$  が回転して、 $z$  軸方向から見て図 4 B 中の点線で示す位置に来る。更に時間が経過すると更にクサビ形状プリズム  $h_6$  が回転して、 $z$  軸方向から見て図 4 D 中の実線で示す位置、 $x$  軸から見て図 4 C の位置に来る。更に時間が経過すると、クサビ形状プリズム  $h_6$  は図 4 D 中の点線で示す位置に達し、更に時間が経過すると図 4 A 及び図 4 B 中の実線で示す位置に戻る。以上の動作は繰り返し行われる。

このように構成された本実施例の光路長可変光学系 9 の作用を説明する。

クサビ形状プリズム  $h_6$  を回転させると、クサビ形状プリズム  $h_6$  部分での光の角振動数に対する位相変調量の傾きが変化するので、群遅延量が時間とともに変化する。その結果サンプル側の被写体の干渉する位置を時間の経過とともに変えることができ、被写体の断層構造が観察できるようになる。

また、クサビ形状プリズム  $h_6$  を回転させると、光導入部  $h_3$  からの入射光の中心周波数の位相が時間とともに変化する所以、光取り出し部  $h_{11}$  における光の中心周波数が光導入部  $h_3$  の中心周波数からシフトする。このため、サンプル側の光と参照側の光を干渉させるとビート信号が発生し、光ヘテロダイン検出が可能になる。

ここで、クサビ形状プリズム  $h_6$  による位相変調と群遅延量の変化、中心周波数のシフトについて詳細に述べる。

本実施例では、第 1 の回折格子  $h_4$  とクサビ形状プリズム  $h_6$  が、それぞれ第 1 の正レンズ  $h_5$  の前側焦点位置と後側焦点位置に配置されているため、クサビ形状プリズム  $h_6$  の面においては、第 1 の回折格子  $h_4$  での情報がフーリエ変換されている。

また、クサビ形状プリズム  $h_6$  と第 2 の回折格子  $h_8$  が、それぞれ第 2 の正レンズ

h 7 の前側焦点位置と後側焦点位置に位置しているので、クサビ形状プリズム h 6 の面においてフーリエ変換されている場合は、第 2 の回折格子 h 8 の面ではそれが逆フーリエ変換されている。

第 1 の回折格子 h 4 ではスペクトル幅を持った光が分散されるので、クサビ形状プリズム h 6 においては、光は第 1 の回折格子 h 4 に入射した光の角振動数ごとに y 軸方向に沿って分布することになる。

格子の空間周波数  $N$  (格子の間隔の逆数) の第 1 の回折格子 h 4 に角度  $\theta_i$  で入射した波長  $\lambda$  の光は次のような角度  $\theta$  に回折される。

$$\sin \theta - \sin \theta_i = m N \lambda$$

但し、 $m$  は整数である。なお、ここでは、 $m = 1$  とする。

従って、光導入部 h 3 から導入される光の中心波長を  $\lambda_o$  としたときに、第 1 の回折格子 h 1 から射出された波長  $\lambda_o$  と波長  $\lambda = \lambda_o + \Delta \lambda$  の光とがなす角度  $\Delta \theta$  は、次式 (1) として表すことができる。

$$\Delta \theta = N \Delta \lambda / \cos \theta \quad \dots\dots (1)$$

第 1 の回折格子 h 4 と第 1 の正レンズ h 5 との間隔および第 1 の正レンズ h 5 とクサビ形状プリズム h 6 との間隔は第 1 の正レンズ h 5 の焦点距離  $f_1$  に等しいので、クサビ形状プリズム h 6 の位置での波長  $\lambda_o$  と波長  $\lambda = \lambda_o + \Delta \lambda$  の光の位置の差  $\Delta Y$  ( $\Delta \lambda$ ) は次式 (1. 1) のように表すことができる。

$$\Delta Y (\Delta \lambda) = f_1 \cdot \Delta \theta \quad \dots\dots (1. 1)$$

従って、 $\Delta \theta$  の値として上記式 (1) を式 (1. 1) に代入すると、次式 (2) になる。

$$\Delta Y (\Delta \lambda) = f_1 \cdot N \cdot \Delta \lambda / \cos \theta \quad \dots\dots (2)$$

ここで、波長  $\lambda = \lambda_o$  の光はクサビ形状プリズム h 6 の回転軸からずれた位置を通るので、波長  $\lambda = \lambda_o$  の光が通る位置を  $Y_o$  とすると、

波長  $\lambda = \lambda_o + \Delta \lambda$  の光がクサビ形状プリズム h 6 を通る位置  $Y (\Delta \lambda)$  は、次式 (3) として表すことができる。

$$\begin{aligned} Y (\Delta \lambda) &= Y_o + \Delta Y (\Delta \lambda) \\ &= Y_o + f \cdot N \cdot \Delta \lambda / \cos \theta \quad \dots\dots (3) \end{aligned}$$

但し、 $f$  は第 1 の正レンズ h 5 および第 2 の正レンズ h 7 の焦点距離であり、 $f =$



$f_1 = f_2$ である（但し、 $f_2$ は第2の正レンズh7の焦点距離である）。

ここで、クサビ形状プリズムh6の正射影ベクトルP1（またはP2）とy軸とのなす角度を $\alpha$ 、クサビ形状プリズムh6の前側、後側の面の法線単位ベクトルN1と法線単位ベクトルN2とのなす角度を $\phi$ として、クサビ形状プリズムh6を通過して第2の回折格子h8に達するまでの光路長について考察する。

クサビ形状プリズムh6の回転軸を通過する光は、クサビ形状プリズムh6が回転しても光路長が変化しないので、クサビ形状プリズムh6の回転軸からY( $\lambda$ )だけ離れた位置を通る光とクサビ形状プリズムh6の回転軸を通る光との光路長差Z(Y)は、 $\phi \ll \pi/2$ のとき次式(4)のように近似できる。

$$Z(Y) = Y(\lambda) \cdot (n-1) \phi \cos \alpha \quad \dots\dots (4)$$

但し、nはクサビ形状プリズムh6の屈折率である。

中心周波数の光がクサビ形状プリズムh6を通る位置は $Y_0$ であるので、 $\alpha = 0$ のときの波長 $\lambda_0$ と、 $\alpha$ が任意の値のときの波長 $\lambda_0 + \Delta\lambda$ との光の位相差 $\Psi(\lambda, \alpha)$ は、

$$\Psi(\lambda, \alpha) = 2\pi \cdot Z(Y) / \lambda_0$$

上記式(4)より、

$$\Psi(\lambda, \alpha) = (2\pi / \lambda_0) \cdot (Y_0 + \Delta Y) \cdot (n-1) \phi \cos \alpha$$

従って、上記式(3)より、

$$\Psi(\lambda, \alpha) = (2\pi / \lambda_0) \cdot (Y_0 + f \cdot N \cdot \cos \theta) \cdot K \cdot \cos \alpha \quad \dots\dots (5)$$

となる。

但し、 $K = (n-1) \phi$ とおいている。

群遅延量を見積もるためには、位相を光の角振動数の関数で表す必要があるので、波長 $\lambda$ の光を角振動数 $\omega$ で置き換えて、 $\alpha = 0$ のときの光の中心角振動数 $\omega_0$ に対する、 $\alpha$ が任意で角振動数 $\omega = \omega_0 + \Delta\omega$ の光の位相差 $\Psi(\omega, \alpha)$ は、次式(6)のように表すことができる。

$$\begin{aligned} \Psi(\omega, \alpha) = & Y_0 \cdot K \cdot \omega \cdot \cos \alpha / c \\ & - 2\pi \cdot (K / \cos \theta) \cdot f \cdot N \cdot \cos \alpha \cdot (\Delta\omega / \omega_0) \end{aligned} \quad \dots\dots (6)$$

但し、 $c$ は真空中での光の速度である。

式(6)に注目すると、クサビ形状プリズムh6は、光の角振動数 $\omega$ に対して位相を線形に変化させていることになるため、群遅延量を変化させる作用があることがわかる。

群遅延距離 $L_g$ は、 $c \times T_g$  ( $T_g$ は群遅延時間)であり、

$$\begin{aligned} T_g &= -d\phi(\omega) / d\omega \mid \omega = \omega_0 \text{で求めることができるので、} \\ L_g &= -K \cdot Y_0 \cdot \cos \alpha + K \cdot f \cdot N \cdot (\lambda_0 / \cos \theta) \cdot \cos \alpha \\ &\dots\dots (7) \end{aligned}$$

と表すことができる。

ここで、クサビ形状プリズムh6を回転させる( $\alpha$ を変化させる)と $\cos \alpha$ の値が-1から+1まで変化するので、群遅延距離 $L_g$ は、

$$2K \mid f \cdot N \cdot \lambda_0 / \cos \theta - Y_0 \mid$$

の幅で変化することになる。これは、サンプル側の光の干渉する位置を

$$\Delta L_s = K \mid f \cdot N \cdot \lambda_0 / \cos \theta - Y_0 \mid$$

だけスキャンできることを意味している(本実施例の構成では、サンプル側の光は往復しているので、サンプル側の光の干渉する位置の変動量は群遅延距離の変動量の半分になる)。

一方、中心波長での位相遅延距離 $L_p$ は、 $c \times T_p$  ( $T_p$ は位相遅延時間)であり、

$$T_p = \Psi(\omega_0) / \omega_0$$

であるので、上記式(6)より、

$$L_p = K \cdot Y_0 \cdot \cos \alpha \dots\dots (8)$$

と表すことができる。

本実施例では $Y_0 \neq 0$ であるので、クサビ形状プリズムh6を回転させると $\alpha$ が変化するので、位相遅延距離 $L_p$ が時間的に変化し、ドップラーシフトが発生する。

ドップラーシフトによる光の中心周波数のシフト量 $\Delta F$ は次のように表される。

$$\Delta F = -(1/\lambda_0) \cdot dL_p / dt$$

但し、 $t$ は時刻である。

本実施例では、サンプル側の光は変調がかけられていないので、参照側の光とサン

プル側の光を干渉させる際に、干渉信号は

$$F_b = (1/\lambda_o) \cdot |dL_p/dt|$$

の周波数をもつビート信号として現れる。これにより光ヘテロダイン検出が可能になる。

一例として、クサビ形状プリズムh6を単位時間あたりRr回転で等速回転運動させた場合を考える。

クサビ形状プリズムh6が単位時間あたりRr回転するので、 $\alpha$ の値は、

$$\alpha = 2\pi \cdot Rr \cdot t + \alpha_o$$

になる。

但し、 $\alpha_o$ は $t=0$ のときのクサビ形状プリズムh6のy軸に対する傾き角である。

時刻tでの群遅延距離Lg(t)および干渉信号のビート周波数 $\Delta F_b(t)$ は、それぞれ

$$L_g(t) = -K \cdot \{Y_o - f \cdot N \cdot (\lambda_o / \cos \theta)\} \cdot \cos(2\pi Rr \cdot t + \alpha_o) \quad \dots\dots (9)$$

$$\Delta F_b(t) = 12\pi \cdot R \cdot K \cdot (Y_o / \lambda_o) \cdot \sin(2\pi Rr \cdot t + \alpha_o) \quad \dots\dots (10)$$

になる。

式(9)および式(10)に注目すると、群遅延距離Lgがcos関数で変化することに対して、ビート周波数 $\Delta F_b$ がsin関数で変化することがわかる。

具体的な例として、図5に、

第1の正レンズh5及び第2の正レンズh7の焦点距離 $f = 50 \text{ mm}$ 、

第1の回折格子h4及び第2の回折格子h8の空間周波数 $N = 600 \text{ 本/mm}$ 、

クサビ形状プリズムh6の角度 $\phi = 6^\circ$ 、

クサビ形状プリズムh6の屈折率 $n = 1.5$ 、

低コヒーレンス光源の中心波長 $\lambda_o = 1.31 \mu\text{m}$ 、

クサビ形状プリズムh6の回転数 $R = 1000 \text{ rps}$ 、

中心波長の光がクサビ形状プリズムh6を通るときの座標 $Y_o = 2 \text{ mm}$ の場合における群遅延距離及び干渉信号のビート周波数の時間経過を示す。

図5より、 $\alpha = \pm \pi/2$ の付近において、図中符号Hで示すような比較的広い範

囲にわたってビート信号の周波数変化は少なくなり、光路長（群遅延距離）もほぼ時間に対して線形にスキャンできていることがわかる。

次に、光取り出し部h 1 1について述べる。

本実施例のような構成の光路長可変光学系では、第2の正レンズh 7と第4の正レンズh 9の焦点距離が次の条件式（1 1）を満たすのが望ましい。

$$NA > f_2 (n - 1) \phi / f_4 \quad \dots\dots (11)$$

但し、 $f_2$ は第2の正レンズh 7の焦点距離、 $f_4$ は第4の正レンズh 9の焦点距離、 $n$ はクサビ形状プリズムh 6のクサビの角度（法線単位ベクトル $N_1$ と法線単位ベクトル $N_2$ とのなす角度）、 $NA$ は出射SMF 1 0の開口数である。

条件式（1 1）は、第4の正レンズh 9で集光された光が光取り出し部h 1 1の出射SMF 1 0に結合されるための条件である。

2つの正レンズh 7，h 9の焦点距離が条件式（1 1）から外れた場合、光取り出し側の出射SMF 1 0に入射する光の角度が大きくなりすぎて光がファイバ中を伝播しなくなる。

この点について説明する。本実施例では、クサビ形状プリズムh 6で光が曲げられるので、第2の回折格子h 8に当たる光はクサビ形状プリズムh 6の回転に伴い所定の半径の円周上を回転運動する。そのときの円の半径 $R$ は、次式（1 2）として表すことができる。

$$R = f_2 \cdot (n - 1) \phi \quad \dots\dots (12)$$

第2の回折格子h 8から射出される光は、入射する光に対して $y-z$ 平面内で曲げられ、 $x-z$ 平面内では曲げられない。このため、第2の回折格子h 8から射出される光は楕円運動する。楕円の長軸の方向は $x-z$ 平面内にあり、そのときの長軸の半径 $R_x$ は右辺が上記式（1 2）と同じく、

$$R_x = f_2 \cdot (n - 1) \phi$$

になる。

一方、短軸の半径 $R_y$ は、

$$R_y = R | \cos \beta |$$

になる。

但し、 $\beta$ は第2の回折格子h 8に入射する中心波長の主光線と第2の回折格子h 8

から射出する光とのなす角度である。

以上の結果より、第4の正レンズh9の位置で入射する光の径が最大になるのは光がx z平面を横切るときであり、そのときに射出SMF10へ入射する光の最大の入射角 $\gamma$ は次式(13)のようになる。

$$\begin{aligned}\gamma &= R_x / f_4 \\ \gamma &= f_2 \cdot (n-1) \phi / f_4\end{aligned}\quad \dots\dots (13)$$

一方、開口数NAのシングルモードファイバは、 $\gamma_{\max} = \sin^{-1}(NA)$

より大きな角度の光は伝播しないので、光を常に取り出すためには次式(14)を満たす必要がある。

$$\gamma_{\max} > \gamma \quad \dots\dots (14)$$

一般にシングルモードファイバはNAが0.2以下であるので、 $\gamma_{\max} \doteq NA$ と近似することができ、このため、

$$NA \doteq \gamma_{\max} > \gamma = f_2 \cdot (n-1) \phi / f_4$$

とおくことができる。

したがって、第2の正レンズh7と第4の正レンズh9の焦点距離は、上記条件式(11)を満たすようにしなければならない。これは光が光取り出し部h11の射出SMF10に結合するための最低条件である。実際には、光取り出し部h11の射出SMF10への結合効率を上げるために、次の条件式(15)を満たすことがより望ましい。

$$0.7NA > f_2 \cdot (n-1) \phi / f_4 \quad \dots\dots (15)$$

さらに本実施例の構成においては、光導入部h3の正のパワーを持つ第3の正レンズh2の焦点距離 $f_3$ と光取り出し部h11の正のパワーを持つ第4の正レンズh9の焦点距離 $f_4$ は次の条件式(16)を満たすことが望ましい。

$$0.5 < D_i \cdot f_4 / (D_o \cdot f_3) < 1.0 \quad \dots\dots (16)$$

但し、 $D_i$ は入射SMF8のモードフィールド径、 $D_o$ は射出SMF10のモードフィールド径である。

この条件式(16)は、光取り出し部h11の射出SMF10への光の結合効率を大幅に下げないための条件である。

射出SMF10の端面での光のモードフィールド径 $D_i$ と光取り出し部h11の第4の正レンズh9を介して集光される光の最小スポットサイズ(ウエストサイズ) $W_o$

は、第1の回折格子h4と第2の回折格子h8の間の光学系がほぼ1倍系のアフォーカル光学系であることを考慮すると、次式のように近似できる。

$$W_o = D_i \cdot f_4 / f_3$$

第4の正レンズh9で集光した光を出射SMF10へ効率よく結合するには、出射SMF10へ集光させたときの光のスポットサイズ $W_o$ と出射SMF10のモードフィールド径 $D_o$ とをできるだけ一致させるのが良い。

$D_i \cdot f_4 / (f_3 \cdot D_o) > 10$ になると、出射SMF10へ集光させたときの光のスポットサイズ $W_o$ が、ファイバのモードフィールド径 $D_o$ よりも非常に大きくなり、ファイバへの光の結合効率が大幅に下がる不具合が発生する。

また、 $D_i \cdot f_4 / (D_o \cdot f_3) < 0.5$ の場合は、出射SMF10に入射する光のNAが大きくなり過ぎるので、ファイバへの光の結合効率が大幅に下がる不具合が発生する。

次に、本実施例において使用するクサビ形状プリズムh6の大きさについて述べる。

クサビ形状プリズムh6の位置においては、第1の回折格子h4と第1の正レンの作用によって光が空間的に広がっているが、クサビ形状プリズムh6の大きさ $\Delta Y_{br}$ は上記式(2)より、

$$\Delta Y_{br} = f_1 \cdot N \cdot \Delta \lambda_{br} / \cos \theta \quad \dots\dots (17)$$

になる。

但し、 $\Delta \lambda_{br}$ は、光路長可変光学系に入射される光の波長の広がり幅である。

OCTシステムでは、光の波長の広がり半値全幅(FWHM)  $\Delta \lambda_{FWHM}$ は数十nm～数百nm程度のものが使用されるので、実際の波長の広がり幅 $\Delta \lambda_{br}$ は、 $\Delta \lambda_{FWHM}$ の数倍と考えても数百nmである。また、回折格子の格子周波数は数百本/mm～千本/mmであり、正レンズの焦点距離も長くても数百mm程度であるので、 $\Delta Y_{br}$ は、数mm～数十mm程度になり、クサビ形状プリズムh6の大きさをコンパクトにすることができる。

このため本実施例によれば、稼動部が小さく、制御が簡単で、光路長のスキャン範囲が広く、高速にスキャニングが可能な透過型光路長可変光学系を達成することができる。

また、光走査プローブに長さによるバラツキがあった場合や、クサビ形状プリズム

h 6 による可変範囲を超えて観察したい場合には光導入部 h 3 を光軸方向に移動することで光路長を調整することができる。

また、通常回折格子 h 4 と第 1 のレンズ h 5 および回折格子 h 8 と第 2 のレンズ h 7 の間隔を  $l_1$ ,  $l_2$  とすると、おおよそ各レンズの焦点距離  $f_1$ ,  $f_2$  であるが、物体側と参照側に用いられている SMF の長さど空気中光路の長さが異なる場合、SMF の分散によりコヒーレント長が長くなることがある。

これを間隔  $l_1$ ,  $l_2$  と回折格子 h 4 への入射角と回折格子 h 8 からの出射角を回折格子 h 4 または回折格子 h 8 の少なくとも 1 つまたは両方を光軸に関し回転し調節することにより、SMF による分散を補償することができる。

また、図 3 の回折格子 h 4, h 8 を他の分散素子に置き換えても同様に構成することが可能である。

図 6 及び図 7 はクサビ形状プリズム h 6 の例を示す。図 6 はプリズム回転軸 4 7 に対して、対向した斜めに研磨された平面 7 3 a、7 3 b から成る。7 3 a、7 3 b のいずれかが光軸に垂直でも構わない。

図 7 は対向した斜面の組 7 4 a, 7 4 b および 7 5 a, 7 5 b からなる。このように面を分割し対向した面の数を倍に増やすことによって、プリズム一回転あたりの深さの走査回数を往復 2 回→4 回に増すことができ、さらに深さ方向の走査速度を増すことができる。この効果は、面の数を増す毎に増すのは当然である。

ここで、図 8 を用いて、上記クサビ形状プリズム h 6 の回転手段について説明する。図 8 に示すように、クサビ形状プリズム h 6 はプリズム台 4 9 およびプリズム押さえ 5 0 に挟まれ固定されている。プリズム台 4 9 はベアリング 5 1 a、5 1 b により回転自在にハウジング 5 2 に保持されている。ハウジング 5 2 は図示しない光路長可変光学系の支持台に固定・位置決めされている。プリズム台 4 9 には歯付プーリ 5 6 a が設けられ、歯付ベルト 5 3 と噛合している。また歯付ベルト 5 3 の他端には歯付プーリ 5 6 b が設けられ、プーリはエンコーダ 5 7 付きのモータ 5 5 に接続される。また、歯付プーリ 5 6 a には遮光板 5 8 が設けられフォトインタラプタ 5 4 で遮光板の位置を検出できる。

モータ 5 5 により歯付プーリ 5 6 b が回転され、歯付ベルト 5 3 により歯付プーリ 5 6 a に伝達されプリズム台 4 9 が回転し、クサビ形状プリズム h 6 が回転軸 4 7 を中

心に回転する。モータ55の回転速度はエンコーダ57で検出され定速に制御される。また遮光板58をフォトインタラプタ54で検出することで回転の原点位置を検出し、さらに遮光板58の位置からのクサビ形状プリズムh6の回転角をエンコーダ57で検出しプリズムの現在の回転角を得る。

プリズムの回転角を正確に知ることができるため、走査位置と得た干渉信号を正確に対応できる。安定して回転できるため、光路長の変化によるドップラー周波数を正確に制御できる。

なお、クサビ形状プリズムh6の回転手段は図8の構成に限らず、例えば図9に示すように構成してもよい。すなわち、図9に示すように、クサビ形状プリズムh6は、内輪59、ハウジング62、内輪に設けられた永久磁石61、ハウジング62に設けられたコイル63、内輪59をハウジング62に対して回転自在に保持するベアリング60a、60bからなる中空ブラシレスモータの内輪59に保持・固定されている。このモータを回転することによりモータの回転軸47を中心にクサビ形状プリズムh6を回転することができる。このモータの内輪に図示しない小型磁石またそれに対向して図示しないホール素子を用いてエンコーダを構成し、回転速度の制御を行うことができる。また図8の遮光板58とフォトカプラ54、または内輪に設けられた明暗のパターンとそれを検出する反射型フォトインタラプタによりクサビ形状プリズムh6の回転原点を検出することができる。

図9の構成の場合、図8の効果に加え、最大で毎分6万回転回轉でき、高速な走査が可能になる。これにより、体動を防ぐことが困難なため生体への適応で重要な、リアルタイムで情報を得ることが可能になる。また、光路長可変の小型化が可能となる。

(作用)

次に、このように構成された本実施例の作用について、図1を参照して説明する。

光カプラ3から光カプラ6を経由し光走査プローブ20を通り、生体組織の特定の点(観察点257)から反射され再び光カプラ6に戻り、第4のSMF13を通り、光カプラ14に至る光路の光遅延時間と、光カプラ3から光路長可変光学系9を経由し光カプラ14に至る光路の光遅延時間の差に対応する光路長差がコヒーレント長以内になると干渉を生じる。その干渉信号をディテクタ17、18、差動アンプ23、復調器24、ADコンバータ25によりコンピュータ27に取り込む。制御回路26により光路



長可変光学系 9 の光遅延時間を変化させると、対応して観察点 2 5 7 が光走査プローブの光出入射方向に対して移動する。観察点 2 5 7 を連続的に移動することにより生体組織 1 6 2 の深さ方向の反射強度の 1 次元的な情報を得ることができる。また、走査駆動装置 2 2 により光の出入射位置 2 5 8 を走査することによって深さと走査方向の 2 次元の画像を得ることができる。これをコンピュータ 2 7 により再構築し、モニタ 2 8 に表示することができる。

#### (効果)

このように本実施の形態では、マッハツエンダー干渉系にすることにより、反射光の微弱な物体側に多くの光源を分配でき、S N 比に大きく影響する物体側からの信号光を大きくでき、分配比を最適化することで S N 比を向上できる。さらに、差分検出によってヘテロダイン信号以外の成分を除去でき、S N 比を向上できる。

また、光源への戻り光が小さいため、高価なアイソレータが不要であり安価にできる。

さらに、光路長可変光学系を透過光学系にすることによって光路長可変光学系内部の光学素子による反射が干渉信号に影響しなくなり光ノイズが減り、S N 比が向上する。

また、光路長可変光学系の入射側と出射後に偏波面コントローラを設けることで、光路長可変光学系が偏光特性を有しても、入射側では光路長可変光学系の偏光特性に合わせるように偏波面コントローラを調整し、出射側では物体側の偏光特性に合わせるように偏波面コントローラを調整することで、光路長可変光学系の光効率を犠牲にせず、物体側と参照側の偏光特性を一致させ、高い干渉出力を得ることができる。

#### 第 2 実施例：

第 2 実施例は、第 1 実施例の光路長可変光学系における第 2 の回折格子より後ろ側の光学要素の構成についての変形例である。

図 1 0 は第 2 実施例の光路長可変光学系における第 2 の回折格子より後ろ側の光学要素を示す概略構成図である。なお、第 2 の回折格子 h 8 よりも前側の光学要素は、第 1 実施例と同じ構成であるので図示を省略する。また、光路長可変光学系以外の本発明の断層観察診断装置のその他の構成は第 1 実施例と同様なので、全体のシステム図は省略する。

第 2 実施例の光路長可変光学系は、第 2 の回折格子 h 8 より後ろ側が、第 1 のコー

ンレンズh 1 2と、第2のコーンレンズh 1 3と、正のパワーを持つ第4の正レンズh 9と、出射SMF 1 0とで構成されている。

なお、コーンレンズとは、片方の面が平面で、もう片方の面が円錐状になったレンズのことである。

本実施例の作用を以下に説明する。

第1実施例の説明で出射SMF 1 0に光を結合するためには、出射SMF 1 0に入射する光の角度 $\gamma$ を、

$$NA > \gamma$$

にしなければならないことは述べたが、出射SMF 1 0に入射する光のスポット径が変化しない限り、 $\gamma$ をさらに小さく取れば出射SMF 1 0への光の結合効率が高くなる。

本実施例では、第1実施例と同様に第2の回折格子h 8から射出された光は、クサビ形状プリズムの回転に伴い、図1 1の符号aで示すように楕円運動をする。

一方、出射SMF 1 0に入射する光の最大角度 $\gamma$ は、楕円運動をして第4の正レンズh 9に入射する光の長軸の半径Rに対して

$$\gamma = R / f_4$$

の関係がある。

従って、第4の正レンズh 9の焦点距離 $f_4$ を長くすることで $\gamma$ の値を小さくすることができる。

しかし、第4の正レンズh 9の焦点距離 $f_4$ を長くすると、第1実施例の条件式(3)に関して説明したように、第4の正レンズh 9で集光される光の最小スポットサイズ(ウェストサイズ)  $W_o$ が大きくなってしまい、結合効率を高くすることができない。

しかし、楕円運動をして第4の正レンズh 9へ入射する光の長軸の半径Rを、例えば図1 1の符号bで示すように、小さくすることができれば第4の正レンズ9の焦点距離 $f_4$ を長くしなくても $\gamma$ を小さくすることが可能になり、その結果、出射SMF 1 0への光の結合効率を高くすることができる。

そこで本実施例では、楕円運動をして第4の正レンズh 9へ入射する光の長軸の半径Rを小さくする手段として、2つのコーンレンズh 1 2, h 1 3を組合せた光学系を用いている。

図12Aは2つのコーンレンズ $h_{12}$ 、 $h_{13}$ の距離が近いときの光の経路であり、図12Bは2つのコーンレンズ $h_{12}$ 、 $h_{13}$ の距離が離れているときの光の経路を表わしている。

2つのコーンレンズ $h_{12}$ 、 $h_{13}$ の間の距離が近い場合は、A面（B面）に入射した光はC面（D面）に当たるため第2のコーンレンズ $h_{13}$ を出た光は、第1のコーンレンズ $h_{12}$ に入射した光と平行にならないので、出射SMF10に入射させることが出来ない。しかし、2つのコーンレンズ $h_{12}$ 、 $h_{13}$ を離していくと、A面（B面）に入射した光がD面（C面）を通るようになり、所定量離れたときにコーンレンズ2を出た光がコーンレンズ1に入射した光と平行になり、この後に配置されている第4の正レンズ $h_9$ によって集光されて出射SMF10に結合させることができる。

図13は楕円運動をする光の、コーンレンズ通過後の $yz$ 平面と平行な方向および $x$ 軸と平行な方向の径を、第1のコーンレンズ $h_{12}$ と第2のコーンレンズ $h_{13}$ との間の距離を変数としてとったグラフである。但し、2つのコーンレンズ $h_{12}$ 、 $h_{13}$ の間の距離が近すぎる領域Vは第2のコーンレンズ $h_{13}$ からの射出光が発散するので表示していない。この領域Vでは、図12A及び図12Bを用いて説明したように、光が出射SMF10に結合されない。しかし、2つのコーンレンズ $h_{12}$ 、 $h_{13}$ の間の距離を少しずつ離していくと、図13の矢印Wで示すように、第2のコーンレンズ $h_{13}$ を通過後の楕円運動をする光の長軸方向および短軸方向の径を第1のコーンレンズ $h_{12}$ を通過前の径に比べて小さくすることができる領域が存在する。

そして、本実施例では、第1のコーンレンズ $h_{12}$ および第2のコーンレンズ $h_{13}$ の間隔を前記した楕円運動をする光の長軸方向および短軸方向の径を小さくするところに設定している。このため、第4の正レンズ $h_9$ の焦点距離が短くても、出射SMF10への光の入射角 $\gamma$ を小さくすることができ、出射SMF10への光の結合効率を大幅に向上させることができる。

なお、本実施例では2つのコーンレンズ $h_{12}$ 、 $h_{13}$ を組合せて楕円運動をする光の径を小さくしたが、図14に示すように、両面が円錐形状に形成された1つのコーンレンズ $h_{12}'$ をコーンレンズ $h_{12}$ 、 $h_{13}$ の代わりに用いても同様の効果が得られる。

第3実施例：

第3実施例は、第1実施例の光路長可変光学系における位相変調素子であるクサビ形状プリズムを別の光学要素に置き換えた例である。

図15は本実施例の光路長可変光学系の概略構成図である。なお、光路長可変光学系以外の本発明の断層観察診断装置のその他の構成は第1実施例と同様なので全体のシステム図は省略する。

本実施例の光路長可変光学系は、入射SMF 8と正のパワーを持つ第3の正レンズh 2とがなる光導入部h 3と、光のスペクトルを空間的に分散させるスペクトル分散要素である第1の回折格子h 4と正のパワーを持つ第1の正レンズh 5とのペアと、前記スペクトル分散要素で分散させられた光を角振動数に対して略線形に位相を変化させる位相変調素子であるプリズムh 6' と、前記位相変調をかけられかつ空間的に分散させられた光を1つの光路に統一させるスペクトル統一要素である正のパワーを持つ第2の正レンズh 7と第2の回折格子h 8とのペアと、正のパワーを持つ第4の正レンズh 9と出射SMF 10とがなる光取り出し部h 11とで構成され、これらの光学要素が光学的に接続されている。

また、本実施例では、第1の正レンズh 5と第2の正レンズh 7には、焦点距離が同じレンズが使用されており、かつ、第1の正レンズh 5と第2の正レンズh 7は、光軸が一致するように配置されている。また、第1の回折格子h 4は、第1の正レンズh 3の前側焦点位置に、プリズムh 6' は、第1の正レンズh 5の後側焦点と第2の正レンズh 7の前側焦点位置に、第2の回折格子h 8は、第2の正レンズh 7の後側焦点位置にほぼ一致するように、それぞれ配置されている。

プリズムh 6' は図16に示すように、光透過性の液体を少なくとも2枚の表面が平らな光透過性のガラス板である、ガラスh 14、h 15で挟んだ態様で構成され、2枚の光透過性のガラス板のなす角度 $\phi$ を時間とともに変化させることができるようになっており、第1の回折格子h 4側のガラスh 14は固定され、第2の回折格子h 8側のガラスh 15を第1の回折格子h 4及び第2の回折格子h 8の格子と同じ方向を向いた軸Cに対して振動させることができるようになっている。

ガラスh 15の振動のさせかたとしては、例えばガルバノ機構をつけた軸にガラスh 15を取り付ける方法があるが、ガラスh 14とガラスh 15とのなす角度を変えることができればその他の方法を用いても構わない。

本実施例の位相変調素子であるプリズムh6' による群遅延について詳しく述べる。

本実施例では、第1実施例と同様の座標系を取ると、

ガラスh15の振動軸Cを通る光と高さYを通る光の光路長差Zは

$$Z = (n-1) \cdot Y \cdot \phi$$

になる。

ここで、nは光透過性液体の屈折率、 $\phi$ はプリズムh6' のガラスh14とガラスh15とのなす角度である。

従って、中心波長の光がプリズムh6' を通る高さをY、Nを格子の空間周波数（格子の間隔の逆数）、 $\theta$ を第1の回折格子h4の後ろ側の面の法線と中心波長の光が射出される光とのなす角度、 $\lambda_0$ を低コヒーレンス光源の中心波長、fを第1の正レンズh5および第2の正レンズh7の焦点距離とすると、角振動数 $\omega_0$ の光と角振動数 $\omega = \omega_0 + \Delta\omega$ の光との位相差 $\Psi(\omega)$ は、次式(18)で表すことができる。

$$\begin{aligned} \Psi(\omega) = & Y_0 \cdot (n-1) \cdot \omega \cdot \phi / c \\ & - 2\pi \cdot (n-1) \cdot f \cdot N \cdot \phi \cdot \Delta\omega / (\omega_0 \cdot \cos\theta) \end{aligned} \quad \dots\dots (18)$$

従って、式(18)よりガラスh14とガラスh15とのなす角度が $\phi$ であるプリズムh6' は、光の角振動数 $\omega$ に対して位相を線形に変化させていることになるため、プリズムh6' は、群遅延量を変化させる作用があることがわかる。

ここで、第1実施例と同様にプリズムh6' による位相変調と群遅延量の変化、中心周波数のシフトについての考察をおこなうと、群遅延距離 $L_g$ と位相遅延距離 $L_p$ 、光の中心集周波数のシフト量 $\Delta F$ は、次式(19)～(21)のようになる。

$$L_g = - (n-1) \cdot Y_0 \cdot \phi + (n-1) \cdot f \cdot N \cdot (\lambda_0 / \cos\theta) \cdot \phi \quad \dots\dots (19)$$

$$L_p = (n-1) \cdot Y_0 \cdot \phi \quad \dots\dots (20)$$

$$\Delta F = - (n-1) \cdot Y_0 \cdot d\phi / dt \quad \dots\dots (21)$$

以上の結果より、ガラスh14とガラスh15とのなす角度 $\phi$ を時間的に変化させれば群遅延量を変化させることができ、結果として光断層構造観測装置の参照側の光路長を変えることができることがわかる。

また、ガラスh 1 5の振動軸Cと中心波長の光が通る位置とをずらすことによって位相遅延量を時間的に変化させて、ドップラーシフトを発生させ、これをサンプル側の信号と合成することで、ビート信号を発生させ、光ヘテロダイン検出が可能になる。

ガラスh 1 4とガラスh 1 5とのなす角度 $\phi$ の時間的な変化のさせかたとしては、例えば、正弦波、三角波などが考えられる。

本実施例では、ガラスh 1 4とガラスh 1 5とのなす角度 $\phi$ が変化すると、第2の回折格子h 8から射出される光は、図17に示すように直線上を動くようになる。このため、第4の正レンズh 9を通過して、出射SMF 10へ入射する光の入射角 $\gamma$ が変化する。

従って、第4の正レンズh 9からの射出光を出射SMF 10に結合させるためには、第2の正レンズh 7の焦点距離 $f_2$ と第4の正レンズh 9の焦点距離 $f_4$ が次の条件式(22)を満足するようにするのが望ましい。

$$NA > f_2 (n-1) \Delta \phi_{\max} / (2 \cdot f_4) \quad \dots\dots (22)$$

但し、 $\Delta \phi_{\max}$ は前記2つの光透過性の板であるガラスh 1 4とh 1 5とのなす角度 $\phi$ の変化量の最大値である。

上記条件式(22)を満たさない場合は、プリズムh 6'のガラスh 1 4とガラスh 1 5とのなす角度 $\phi$ を変化させたときに、出射SMF 10へ入射する光の入射角 $\gamma$ が大きくなりすぎて光が出射SMF 10に結合されなくなる部分が出てくる。

ガラスh 1 4とガラスh 1 5とのなす角度 $\phi$ を変化させたときに、出射SMF 10への光の結合効率をより上げるためには、次の条件式(23)を満たすことが望ましい。

$$0.7 NA > f_2 (n-1) \Delta \phi_{\max} / (2 \cdot f_4) \quad \dots\dots (23)$$

また、第1実施例と同様な議論から、出射SMF 10のモードフィールド径と第4の正レンズh 9で集光する光のスポットサイズとの差を小さくして、出射SMF 10への光の結合効率を大幅に下げないために、光導入部h 3の第3の正レンズh 2の焦点距離 $f_3$ と光取り出し部h 11の第4の正レンズh 9の焦点距離 $f_4$ とを次の条件式(24)を満たすように設定することが望ましい。

$$0.5 < D_i \cdot f_4 / (D_o \cdot f_3) < 1.0 \quad \dots\dots (24)$$

但し、 $D_i$ は光導入部h 3の入射SMF 8のモードフィールド径、 $D_o$ は光取り出し部h 11の出射SMF 10のモードフィールド径である。

本実施例では、ガラスh 1 5を振動させる角度を大きくとらなくても第1の正レンズh 5および第2の正レンズh 7の焦点距離fを大きく取れば光路長のスキャン幅を大きくとることができるので、ガラスを振動させるときの角度が数十ミリラジアン程度の小さい角度でもって十分に広いスキャンがおこなえる。

ガラスの振動量が小さいと、ガラスを高速に振動させることができるとともに制御も安定して行なえるというメリットがある。

したがって、本実施例のようなプリズムを使用すれば、稼動部が小さく、制御が簡単で、光路長のスキャン範囲が広く、高速にスキャニングが可能な透過型光路長可変光学系を達成することができる。

なお、本実施例ではガラスh 1 4を固定し、ガラスh 1 5を振動させるように構成したが、ガラスh 1 4を振動させ、ガラスh 1 5を固定するように構成しても、或いは、ガラスh 1 4とガラスh 1 5の両方を同時に振動させるように構成しても、同様の効果が得られる。

#### 第4実施例：

第4実施例は、第3実施例における第2の回折格子h 8より後ろ側の光取り出し部h 1 1の構成のみを変えた例である。

図1 8 A及び図1 8 Bは本実施例の光路長可変光学系における第2の回折格子8より後ろ側の光学要素の構成を示す概略構成図であり、図1 8 Aは第2軸から見た図、図1 8 Bは第1軸から見た図を夫々示している。

但し、本実施例では、第2軸をスペクトル分散要素によって空間的に分散させられた光の方向に垂直な方向、すなわち、第1の回折格子の格子の方向と平行な方向にとり、第2軸に垂直な方向に第1軸をとっている。

なお、第2の回折格子h 8よりも前側の光学要素は、第1実施例と同じ構成であるので図示を省略する。また、光路長可変光学系以外の本発明の断層観察診断装置のその他の構成も第1実施例と同様なので全体のシステム図は省略する。

本実施例の第2の回折格子h 8より後ろ側の光取り出し部h 1 1'は、第1軸の方向に正のパワーを持ち第1軸に垂直な第2軸の方向にパワーを持たないレンズh 1 6と、第1軸の方向にパワーを持たず第2軸の方向に正のパワーを持つレンズh 1 7と、出射SMF 1 0とで構成されている。

レンズh 1 6は、後ろ側の面が平面で前側の面が第2軸の方向と平行な方向を軸として円筒形状に形成されたシリンドリカルレンズである。

また、レンズh 1 7は、後ろ側の面が平面で前側の面が第1軸の方向と平行な方向を軸として円筒形状に形成されたシリンドリカルレンズである。

レンズh 1 6およびレンズh 1 7は、第1軸方向のビームウエスト位置と、第2軸方向のビームウエスト位置が出射SMF 1 0の端面とほぼ一致するように配置されている。

レンズh 1 6およびレンズh 1 7の焦点距離は次のように設定することが望ましい。

光取り出し部h 1 1'の出射SMF 1 0に光を結合するために、レンズh 1 6の第1軸方向の焦点距離 $f_4 a$ が次の条件式(25)を満足するようにする

$$NA > f_2 (n-1) \Delta \phi_{\max} / (2 \cdot f_4 a) \quad \dots\dots (25)$$

但し、 $\Delta \phi_{\max}$ は前記2つの光透過性の板のなす角度 $\phi$ の変化量の最大値である。

上記条件式(25)を満たさない場合は、図15に示すプリズムh 6'のガラスh 1 4とガラスh 1 5とのなす角度 $\phi$ が大きくなったときに、出射SMF 1 0に入射する光の入射角が大きくなりすぎるため、入射光のうち出射SMF 1 0に結合されない部分が出てしまう。

さらに、出射SMF 1 0への光の結合効率を大幅に下げないために、光導入部の第3の正レンズの焦点距離 $f_3$ 、光取り出し部h 1 1'のレンズh 1 6の第1軸方向の焦点距離 $f_4 a$ 、レンズh 1 7の第2軸方向の焦点距離 $f_4 b$ を次の条件式(26)、(27)を満たすように設定することが望ましい。

$$0.25 < D_i \cdot f_4 a / (D_o \cdot f_3) < 10 \quad \dots\dots (26)$$

$$0.5 < D_i \cdot f_4 b / (D_o \cdot f_3) < 5 \quad \dots\dots (27)$$

但し、 $D_i$ は光導入部のシングルモードファイバのモードフィールド径、 $D_o$ は光取り出し部の出射SMF 1 0のモードフィールド径である。

群遅延距離 $L_g$ の変化量を大きく取るためには、上記式(19)より第2の正レンズの焦点距離 $f_2$ を長くするか、前記2つの光透過性の板であるガラスh 1 4、h 1 5のなす角度 $\phi$ の変化量の最大値 $\Delta \phi_{\max}$ を大きくする必要がある。光路長可変光学系の光取り出し部h 1 1'のレンズh 1 6、h 1 7に通常のレンズを使用する場合において、 $f_2$ や $\Delta \phi_{\max}$ を大きくしたときは、上記条件式(22)を満たすために光取



り出し部h 1 1' のレンズh 1 6, h 1 7の焦点距離を長くする必要がある。

しかし、レンズh 1 6, h 1 7の焦点距離を長くすると、図19 Aに示すように、光取り出し部h 1 1' の出射SMF 1 0のファイバ端面での光のスポットサイズが出射SMF 1 0のモードフィールド径に比べて大きくなりすぎてしまうので出射SMF 1 0への光の結合効率が落ちてしまう。

そこで、本実施例のように第1軸方向と第2軸方向のパワーを独立に設定できるようにして、光が振れる第1軸の方向では、レンズh 1 6の第1軸の方向の焦点距離を上記条件式(25), (26)に合うように設定し、光が振れない第2軸の方向では、レンズ17の第2軸の方向の焦点距離を上記条件式(27)に合うように設定すると、光取り出し部のファイバ端での光のスポット形状が図19 Bに示すようになり、スポットサイズが光取り出し部h 1 1' の出射SMF 1 0のモードフィールド径に極力近づいて、ファイバーへの光の結合効率が大幅に向上する。

このため、本実施例によれば、光路長のスキャン幅を大きくし、かつ、光取り出し部のファイバーへの結合効率が高い光路長可変光学系を達成できる。

#### 第5実施例：

第5実施例は、第3実施例の光路長可変光学系のプリズムh 6を第1のプリズムと第2のプリズムに置き換えて構成した例である。

図20は本実施例の光路長可変光学系を示す概略構成図である。なお、光路長可変光学系以外の本発明の断層観察診断装置のその他の構成は第1実施例と同様なので全体のシステム図は省略する。

本実施例の光路長可変光学系は、入射SMF 8と正のパワーを持つ第3の正レンズ2とからなる光導入部h 3と、光のスペクトルを空間的に分散させるスペクトル分散要素である第1の回折格子h 4と正のパワーを持つ第1の正レンズh 5のペアと、前記スペクトル分散要素で分散させられた光を角振動数に対して略線形に位相を変化させる位相変調素子である前側のプリズムh 1 8と、光路補正用の後ろ側のプリズムh 1 9と、前記位相変調をかけられかつ空間的に分散させられた光を1つの光路に統一させるスペクトル統一要素である正のパワーを持つ第2の正レンズh 7と第2の回折格子h 8のペアと、正のパワーを持つ第4の正レンズh 9と出射SMF 1 0とからなる光取り出し部h 1 1とで構成され、これらは光学的に接続されている。

また、本実施例では、第1の正レンズh5と第2の正レンズh7には、焦点距離が同じレンズが使用されている。また、第1の回折格子h4は、第1の正レンズh3の前側焦点位置に、前側のプリズムh18は、第1の正レンズh5の後側焦点と第2の正レンズh7の前側焦点位置に、第2の回折格子h8は、第2の正レンズh7の後側焦点位置にほぼ一致するように、それぞれ配置されている。

前側のプリズムh18は、光透過性素材のガラスでできたクサビ形状プリズムであり、図21に矢印で示すように、プリズムを光が進行している方向及び光のスペクトルが空間的に分散されている方向のいずれに対しても略垂直な方向を軸として振動させることにより、時間の経過とともに群遅延量を変化させて、光路長を変化させることができるようになっている。

前側のプリズムh18を振動させる方法としては、例えば、ガルバノ機構を付けた軸に前側のプリズムh18を取り付ける方法があるが、その他の方法を用いても構わない。

また、光路補正用の後ろ側のプリズムh19は、前側のプリズムh18を介して大きく曲げられた光の進行方向を元の方向に近づけるためのものであり、本実施例では、前側のプリズムh18と同じクサビ角で、同じ屈折率のものが、前側のプリズムh18の直後に上下逆向きにして配置されている。また、後ろ側のプリズムh19は、稼動部を備えてなく固定されている。

図22は第1の回折格子4に対する前側のプリズムh18の傾き角を変化させたときの、前側のプリズムh18に入射する光の位置に関する位相の傾き量を示すグラフである。

図22より、前側のプリズムh18の傾き角を変えると、位相の傾き量が変わることがわかる。

本実施例の構成では、前側のプリズムh18の近傍では第1の回折格子h4を介して光が角振動数の成分によって空間的に分散されているため、前側のプリズムh18の傾き角を時間の経過とともに変えて、位相の傾き量を時間の経過とともに変化させることによって群遅延量が変わり、結果的に光路長を変化させることができるようになっている。

本実施例では、前側のプリズムh18を高速で振動させるために前側のプリズムh

18を振動させる角度を数十ミリラジアンと小さくしても、第1の正レンズh5および第2の正レンズh7の焦点距離を長くするか、第1の回折格子h4及び第2の回折格子h8の格子周波数を高くするか、回折格子を傾けて光の分散量を大きくすることによって群遅延距離を増幅することができるので、高速で光路長の振れ幅が広い光路長可変光学系を達成することができる。

なお、本実施例では、第2の回折格子h8よりも後ろ側に配置された第4の正レンズh9に通常の軸対称のレンズを用いたが、第4実施例と同様にシリンドリカルレンズで構成すれば、光取り出し部のファイバへの結合効率がより高い光路長可変光学系が得られる。

また、図23に示すように、クサビ形状をした後ろ側のプリズムh19'を第1の正レンズh5の後ろ側焦点位置と第2の正レンズ7の前側焦点位置にほぼ一致するように配置し、後ろ側のプリズムh19'と同じクサビ角、同じ屈折率のクサビ形状の前側のプリズムh18'を後ろ側のプリズムh19'の直前に配置し、前側のプリズムh18'を固定して、後ろ側のプリズムh19'を光が進行している方向及び光のスペクトルが空間的に分散されている方向のいずれに対しても略垂直な方向を軸として振動させても本実施例と同様な効果が得られる。

#### 第6実施例：

本発明の光断層構造観測装置およびそれに用いられる光路長可変光学系の第6実施例を図24～図26に示す。

本実施例のOCTシステムは、マハツェンダー型干渉計を基本としている。

図24に示すように、本実施例の光断層構造観測装置では、低コヒーレンス光源h21から射出された光は、シングルモードファイバh22を通り第1のカップラーh23へと導かれ、導かれた光は、第1のカップラーh23を介してサンプル側と参照側とに分離される。

サンプル側に分離された光は、シングルモードファイバh24、光サーキュレータh25、シングルモードファイバh26、サンプル側先端光学系h27を経て被写体（測定対象）h28に照射される。被写体h28で反射された光は、再びサンプル側先端光学系h27、シングルモードファイバh26を経て、光サーキュレータh25へ戻ってくる。光サーキュレータh25へ戻ってきたサンプル側の光は、第2の音響光学素子

(AOM) h 4 0 へつながっているシングルモードファイバ h 3 0 の方へ選択的に導かれ、第 2 の AOM h 4 0 を通った後にシングルモードファイバ h 4 2 を介して第 2 のカップラー h 2 9 へと導かれる。

一方、参照側に分離された光は、光路長可変光学系 h 3 1' への光導入用シングルモードファイバ h 3 2 を介して光路長可変光学系 h 3 1' まで導かれる。光路長可変光学系 h 3 1' に入射した光は光路長が変化させられた後に、光取り出し用のシングルモードファイバ h 3 3 に取込まれ、第 1 の音響光学素子 (AOM) h 4 1 を通った後にシングルモードファイバ h 4 3 を介して第 2 のカップラー h 2 9 へと導かれる。

サンプル側経路から導かれた光と参照側経路から導かれた光とは、第 2 のカップラー h 2 9 で合成され、それにより生じる干渉信号が第 2 のカップラー h 2 9 から出力される。第 2 のカップラー h 2 9 で合成されて生じた干渉信号は、シングルモードファイバ h 3 5, h 3 6 を介して第 1 のディテクター h 3 7, 第 2 のディテクター h 3 8 へと分配されて導かれる。第 1 のディテクター h 3 7 と第 2 のディテクター h 3 8 では、それぞれ光の強度の検出が行なわれる。第 1 のディテクター h 3 7 と第 2 のディテクター h 3 8 とで差分ディテクター h 3 9 を構成しており、干渉信号を検出するときには、干渉信号の成分のみが出力され、それ以外の成分 (直流成分) は除去されるようになっている。

この光断層構造観測装置に用いられる本実施例の光路長可変光学系 h 3 1' は、図 2 5 に示すように、第 1 実施例と異なり、クサビ形状プリズム h 6 の回転軸と中心波長の主光線が通る位置とを一致させている。なお、それ以外の構成は第 1 実施例と同じである。

すなわち、本実施例の光路長可変光学系 h 3 1' は、図 2 4 では光導入用シングルモードファイバ h 3 2 に相当する入射 SMF 8 と正のパワーを持つ第 3 の正レンズ h 2 とからなる光導入部 h 3 と、光のスペクトルを空間的に分散させるスペクトル分散要素である第 1 の回折格子 h 4 と正のパワーを持つ第 1 の正レンズ h 5 のペアと、前記スペクトル分散要素で分散させられた光を角振動数に対して略線形に位相を変化させる位相変調素子であるクサビ形状プリズム h 6 と、前記位相変調をかけられかつ空間的に分散させられた光を 1 つの光路に統一させるスペクトル統一要素である正のパワーを持つ第 2 の正レンズ h 7 と第 2 の回折格子 h 8 のペアと、正のパワーを持つ第 4 の正レンズ h

9と図2.4では光取り出し用のシングルモードファイバh 3 3に相当する出射SMF 10とからなる光取り出し部h 1 1とで構成され、これらは光学的に接続されている。

クサビ形状プリズムh 6は、光を透過する素材であるガラスでできている。

また本実施例では、第1の正レンズh 5と第2の正レンズh 7には、焦点距離が同じレンズが使用されており、かつ、第1の正レンズh 5と第2の正レンズh 7は、光軸が一致するように配置されている。また、第1の回折格子h 4は、第1の正レンズh 3の前側焦点位置に、クサビ形状プリズムh 6は、第1の正レンズh 5の後側焦点と第2の正レンズh 7の前側焦点位置に、第2の回折格子h 8は、第2の正レンズh 7の後側焦点位置にほぼ一致するように、それぞれ配置されている。

クサビ形状プリズムh 6は、光の進行方向に対して略平行な方向を軸として回転可能に設けられている。また、クサビ形状プリズムh 6の回転軸は、図2 6に示すように、光導入部h 3から導入される光の中心波長の光の主光線が通る位置と一致している。

また、クサビ形状プリズムh 6の向きは、クサビ形状プリズムh 6を回転させたときにクサビ形状プリズムh 6の前側の面の法線単位ベクトルN 1および後側の面の法線単位ベクトルN 2のx y平面側への正射影のベクトルP 1，P 2の絶対値が変化しないようにしてある。

但し、法線単位ベクトルN 1，N 2は、z軸とクサビ形状プリズムh 6の前側または後側の面との交点を基点として、ベクトルN 1又はN 2と光の進行方向のなす角度が鋭角になる方向に取ることとする。

本実施例の群遅延距離L<sub>g</sub>、位相遅延距離L<sub>p</sub>、光の中心周波数のシフト量ΔFは、第1実施例で導いた式(7)，(8)等において、クサビ形状プリズムの回転軸が中心波長の光の主光線が通る位置と一致させてある条件 Y<sub>o</sub>= 0とおいた値と一致する。

すなわち、次式(28)～(30)となる。

$$L_g = (K / \cos \theta) \cdot f \cdot N \cdot \lambda_o \cdot \cos \alpha \quad \dots\dots (28)$$

$$L_p = 0 \quad \dots\dots (29)$$

$$\Delta F = 0 \quad \dots\dots (30)$$

上記式(28)～(30)より、本実施例では、クサビ形状プリズムh 6が回転すると光路長は変化するが、光の中心周波数のシフトは起こらないことがわかる。

なお、光ヘテロダイン検出をおこなうためには、参照側とサンプル側の少なくとも

一方で光の周波数のシフトをおこなう必要がある。第1～第5実施例はこれを光路長可変光学系h31でおこなっていたが、本実施例においては、光ヘテロダイン検出をおこなうための光の周波数のシフトを参照側の第1の音響光学素子(AOM)h41とサンプル側の第2の音響光学素子(AOM)h40とでおこなっている。第1のAOMh41および第2のAOMh40における光の周波数シフト量をそれぞれF a 1、F a 2、光源の中心周波数をF oとすると、第1のAOMh41を通過後の参照側の光の中心周波数はF o + F a 1、第2のAOMh40を通過後のサンプル側の光の中心周波数はF o + F a 2となるので、本実施例で得られる干渉光のビート信号の周波数F bは、

$$F b = | F a 1 - F a 2 |$$

となる。

一般にAOMの周波数のシフト量F a 1およびF a 2は一定であるので、干渉光のビート周波数F bも一定になる。そして、ビート周波数が一定の場合、干渉信号が電気信号に変換された後のバンドパスフィルターの帯域を狭くすることができSN比を向上させることができる。

一方、第1～第5実施例の構成によれば、光路長可変光学系が光の中心角振動数をシフトさせる光学要素を兼ねているので、構成が簡単で安価なシステムが構築できるというメリットがある。

なお、本第6実施例では音響光学素子を参照側とサンプル側の両方に配置しているが、音響光学素子を参照側とサンプル側のいずれか一方に配置して構成しても本実施例と同様の効果が得られる。

また、光取り出し部を第2実施例と同様のコーンレンズを使用して構成しても同様な効果が得られる。

さらに、本実施例では光路長可変光学系h31'における位相変調素子としてクサビ形状プリズムh6を使用した。第3～第5実施例と同様の光路長可変光学系で用いている位相変調素子及び光取り出し部の構成を用いても、位相変調素子の位相が変化しない位置と、中心角振動数の光が通る位置とを合わせることによって、本実施例と同様の効果が得られる。

第7実施例：

図27ないし図30Bを用いて第7実施例を説明する。

図27は図1の光路長可変光学系9の構成を示す構成図である。

図27に示すように、光路長可変光学系9は、生体組織の深さ方向つまり光軸方向の特定範囲からの散乱・反射光を検出するため高速に数mm程度変化させる入射SMF8から出射した光をビーム状に変換する第1の光コリメータk42と、光ビームの方向を変更する第1の音響光学偏向器k43と、前記方向を変更された光ビームを光軸k45と平行となるようにする第1のフレネルレンズk44と、前記の光軸k45と平行な光を第2の音響光学偏向器k47に向かわせる第2のフレネルレンズk46と、前記第2の音響光学偏向器k47に入射した光を再び光軸k45と一致させるための前記第2の音響光学偏向器k47と、出射SMF10に光を効率よく導光する第2の光コリメータk48と、光走査プローブの長さに応じて変化させる光軸方向に移動可能な移動ステージk49とから構成される。

ここで、フレネルレンズk44，k46は輪帯状の多くのプリズムから作られた薄いレンズである。

移動ステージk49には入射SMF8と第1の光コリメータk42と第1の音響光学偏向器k43とフレネルレンズk44が固定され、一体となって移動する。つまり、光走査プローブの長さの違いによる光路長変化は移動ステージk49で調整される。

図28に音響光学偏向器k43，k47の詳細を示す。

音響光学偏向器とは物質に超音波を印可することで屈折率の変化を誘起し、光が回折を受ける現象から光ビームの方向を制御する光学素子である。音響光学偏向器k43(k47)は超音波を発生するLiNbO<sub>3</sub>等からなるトランスデューサk43aと、熔融石英、テルライトガラス、ガリウムフッソファイド、インジウムフッソファイド等からなる光学材料k43bと吸音材k43cから構成される。例えば、光ビームk43dを光学材料k43bに入射し、前記トランスデューサk43aに超音波f<sub>1</sub>を加えると、光学材料k43b内に発生した屈折率変化により、1次回折光k43eが発生し、1次回折光θ<sub>1</sub>は次式で表わされる。

$$\theta_1 = \lambda_0 \times f_1 / v \quad \dots (31)$$

ここで、λ<sub>0</sub>は真空中の光の波長、f<sub>1</sub>は超音波周波数、vは音速である。

さらに超音波周波数をf<sub>1</sub>からΔf変化させると、その変位角Δθは

$$\Delta\theta = \lambda_0 \times \Delta f / v \quad \dots (32)$$

となる。

図29を使って光路長の変化について説明する。

図29のように、フレネルレンズk44の焦点距離Lとなるように音響光学偏向器k43とフレネルレンズk44を配置し、音響光学偏向器k43により光軸k45より $\theta_2$ で偏向した場合の光路長aと $\theta_2$ よりさらに $\Delta\theta$ で偏向した場合の光路長bとの差は

$$b - a = L / \cos \theta_2 - L / \cos (\theta_2 + \Delta \theta) \quad \dots (33)$$

となる。

つまり、入射SMF8から出射した光を第1の光コリメータk42でビーム状に変換し、第1の音響光学偏向器k43で光ビームの方向を変更する。さらに、第1のフレネルレンズk44で前記方向を変更された光ビームを光軸k45と平行となるようにすることで、(33)式に対応した光路長変化が生じる。

尚、本実施の形態では前記とは逆の作用で出射SMF10に光を導光しており、この場合、光路長変化は(3)式の2倍となる。このとき、以下の条件下で光を走査した場合の光路長変化は図30A及び図30Bのようになる。

$$v = 5.1 \text{ km/s}$$

$$\lambda_0 = 1.3 \mu\text{m}$$

$$L = 20 \text{ cm}$$

$$\Delta f = 300 \text{ MHz} / 15 \mu\text{s} \quad (\text{例えば周波数をノコギリ波状に変化させる})$$

$\theta_2 = 0^\circ$ 、つまり光軸k45より光を走査した場合では、図30Aに示す光路変化となり、 $\theta_2 = 7^\circ$ つまり、光軸k45に対し $7^\circ$ のオフセットを持って光を走査した場合では、図30Bに示す光路変化となる。 $\theta_2 = 0^\circ$ の時の光路長の変位は1.2 mm程度であり、それに対し、 $\theta_2 = 7^\circ$ の時の光路長の変位は5 mmである。

一方で、 $\theta_2 = 0^\circ$ に比べ $\theta_2 = 7^\circ$ の方が光路長変化一定である。つまり、 $\theta_2 = 7^\circ$ の様にオフセットを持たせることで光路長の変位を大きくかつ線形的な変位を得ることができ良好な干渉信号を得ることができる。従って、本実施の形態では $\theta_2 = 7^\circ$ に設定している。

このように、本実施の形態では、音響光学偏向器k43、k47に入力する超音波周波数を変化するだけであり、従来のモータ等の機械的走査手段に比べ高速に駆動でき、



高速に連続した光断層画像をS/N良く生成することができる。

また、光路長変化の線形性が高く効率が高い。従来のsin駆動では90°、270°付近では光路長の非線形性が高く、効率低下、S/N低下の要因となる。

図31は図27の光走査手段である電気光学偏向器k43、k47の第1の変形例を示す構成図である。

第1の変形例の電気光学偏向器k148は、前記音響光学偏向器k43、k47と同様、光の向きを変化させることのできる光学素子である。前記音響光学偏向器k43、k47の代わりに電気光学偏向器k148を光路長可変光学系9に配賦することで同様の効果が得られる。

この電気光学偏向器k148は、図31に示すように、電気光学結晶k149、k150を互いにその光学軸が逆方向に貼り合せ上下に電極k151、k152を付ける。光ビーム径Dの光を電気光学結晶k149側に入射し、電極k151、k152に印可電圧Vを加えると電気光学結晶k149、k150の間に $\Delta n$ の屈折率変化が生じ、その結果、光軸は $\Delta \theta$ だけ変位する。

$\Delta \theta$ と電気光学結晶の距離L、光ビーム径Dとの間には以下の関係式がある。

$$\Delta \theta = \sin^{-1} (2 \Delta n L / D) \quad (34)$$

ここで、 $\Delta n$ は印可電圧Vにより変化する。つまり印可電圧Vを変化することで、光の向きを変化させることができる。

図32Aないし図32Cは図27の光走査手段である電気光学偏向器k43、k47の第2の変形例のホログラムスキャナk53を示す構成図である。ホログラムスキャナk53は、前記音響光学偏向器k43、k47と同様、光の向きを変化させることのできる光学素子である。

図32Aはホログラムスキャナk53を横方向から見た図であり、図32Bは図32AのB方向つまり上方から見た図、図32Cは図32AのC方向つまり右方から見た図である。

図32Aないし図32Cのように、第2の変形例のホログラムスキャナk53は、回転ディスクk54に複数のホログラム素子k55が同心円状に配列されており、この回転ディスクをモータk56で回転する。光ビームk57をホログラム素子k55に入射すると回折効果により光ビームk57は光ビームk58のようにその向きを変える。

さらに、回転ディスクをモータk 5 6で回転させると、光ビームはホログラム素子k 5 5の入射位置に対応して光ビームk 5 8からk 5 9のようにその角度を変化することができる。ホログラム素子としては直線格子、ホログラムレンズが使用できる。

この第2の変形例のホログラムスキャナk 5 3は、音響光学素子や電気光学素子に比べ安価である。

図3 3は図1の光路長可変光学系9の変形例を示す構成図である。ここでは、光路長可変光学系9と異なる部分を説明し、同じ部分については同じ番号を付し説明は省略する。

光路長可変光学系9の変形例の光路長可変光学系k 6 0は、図3 3に示すように、前記フレネルレンズk 4 4, k 4 6の代わりに第1及び第2の凸レンズk 6 1, k 6 2が配置されている。さらに第1及び第2の凸レンズk 6 1, k 6 2の間に階段状の光学ブロックk 6 3が配置されている。

前記光学ブロックk 6 3は、図3 4に示すように、微小プリズムアレーk 6 4と三角プリズムk 6 5が貼り合わさったものである。例えば、微小プリズムアレーは屈折率 $n=1.5$ 、角度 $\theta=9.5^\circ$ 、ピッチ $p=0.3\text{ mm}$ のプリズムが200個並んだものである。また、三角プリズムk 6 5は屈折率 $n=1.5$ 、長さ $l=60\text{ mm}$ 、厚み $d=10\text{ mm}$ である。

入射SMF 8から出射した光を第1の光コリメータk 4 2で $\phi 0.2\text{ mm}$ 程度のビーム光に変換し、第1の音響光学偏向器k 4 3でビーム光の方向を変更する。さらに第1の凸レンズk 6 1で前記方向を変更された光ビームを光軸k 4 5と平行になるようにする。さらにその平行光を光学ブロックk 6 3に透過させる。

この時、第1の音響光学偏向器k 4 3で光学ブロックk 6 3に対し光路k 6 6のように光を走査した場合、その走査位置に対応して光路長変化を生じる。

例えば、符号k 6 6 aと符号k 6 6 bの位置を透過した光の光路差は光学ブロックを透過する光路差 $\times$ 屈折率差であり、上記の場合は $d \times (n - 1.0) = 60 \times (1.5 - 1.0) = 5\text{ mm}$ となり、200個のプリズムから1ピッチ当たり $25\text{ }\mu\text{m}$ の分解能となる。さらに光学ブロックk 6 3を透過した光は第2の凸レンズ6 2で第2の音響光学偏向器k 4 7の一点に入射され、前記光路長可変光学系9同様出射SMF 10に導光される(図3 3参照)。

尚、光学ブロックのピッチ、プリズム数、長さ、厚みはこの値に限定されるものではなく、この値を変化することで分解能、走査範囲を変化することができる。

光路長可変光学系9の変形例の光路長可変光学系k66では、光学ブロックを変更することで最大光路差を容易に変更できる。

#### 第8実施例：

図35A及び図35Bは本発明の第8実施例に係わる光路長可変光学系の構成を示し、本実施例の光路長可変光学系に関しては、光路長可変光学系9と異なる部分を説明し、同じ部分については同じ番号を付して説明を省略する。

図35A及び図35Bに示すように、本実施例の光路長可変光学系k67は、前記入射SMF8から出射した光を扇状に広げる第1のシリンドリカルレンズk68と、前記扇状に広がった光を平行にする第2のシリンドリカルレンズk69と、前記平行な光k72の一部を透過しビーム光k73にする複数の長方のスリット穴k71a-k71h（図36参照）が開いた回転可能な回転ディスクk70と、光学ブロックk63と、前記ビーム光k73を出射SMF10に入射するための第3のシリンドリカルレンズk74と、第2のコリメーターk48より構成されている。

前記第一のシリンドリカルレンズk68は光を薄い扇状に変換するため凸と凹のシリンドリカルレンズを90°方向づらして貼り合わされたものである。

まず、前記入射SMF8から出射した光を第1のシリンドリカルレンズk68により扇状に広げ、さらに第2のシリンドリカルレンズk69で前記扇状に広がった光を平行な光k72に変更する。

そして、図36に示すように、回転ディスクk70では複数の長方のスリット穴k71a-71hが空いており、この回転ディスクk70を回転させると平行な光k72に対しスリット穴が横切るので、その結果、回転ディスクk70を透過する光はビーム光k73に変換されると共に、回転角により、ビーム光k73を光学ブロックk63に対し走査することができる。

例えば回転ディスクk70のスリットは幅0.1mm、長さ10mm程度で8つのスリットが放射状に等間隔に配置されている。この回転ディスクを24000rpmで回転すると3200走査/秒が可能となる。

1画面512本の走査線で構成する場合には6.25画面/秒となる。尚、回転ディ

スクの幅、長さ、スリット数、回転数はこの値に限定されるものではなく、この値を変化することで走査速度を変化することができる。

このように高速で走査されるビーム光k 7 3は光学ブロックk 6 3を透過し、その入射位置に対応して光路が変化する。さらにそのビーム光k 7 3はシリンドリカルレンズk 7 4と第2のコリメーターk 4 8により出射SMF 1 0に導光される。

図3 7は図3 5の回転ディスクの変形例を示す構成図である。第2の回転ディスクk 7 5には複数の微小なピンホールk 7 6が空いており、その穴が平行光k 7 2に対し、位置がずれて通過する様になっている。つまり、第2の回転ディスクk 7 5を回転することで、図3 5のビーム光k 7 3の様に、光を走査することができる。このような回転ディスクはニボウディスクと言う名で一般的に知られている。

このように本実施の形態では、音響光学偏向器のような高価な部品が不要となり、また、光の走査範囲が広く、分解能を高く出来る（音響光学偏向器は偏向できる角度が小さい）。

#### 第9実施例：

図3 8は本発明の第9実施例に係わる光路長可変光学系の構成を示す構成図である。ここでは、図3 5 Aの光路長可変光学系9と異なる部分を説明し、同じ部分については同じ番号を付して説明を省略する。

図3 8に示すように、本実施例の光路長可変光学系k 7 7は、前記入射SMF 8から出射した光をビーム光k 7 8に変換する第1のコリメーターk 4 2と、光学ブロックk 6 3と同等な光学ブロックk 6 3 a～k 6 3 dが固定された第3の回転ディスクk 7 9（図3 9参照）とより構成される。

本実施例ではビーム光k 7 8は、変化せず常に光軸上にある。そのビーム光に対し光学ブロックk 6 3 a～k 6 3 dが横切ること、光路長を変化することができる。

本実施の形態では光学ブロックを4つ配置した例を示したが、そのブロックを増やすことで、回転ディスク1回転当たりの走査本数を増やすことができる。

また、光学ブロックを図4 0のk 8 0のように回転ディスクと一体化することができる。k 8 1の1回転で2回走査することができる。また、図4 1のk 8 1のように、図4 0のk 8 0と同様な光学ブロックk 8 2 a～k 8 2 dを貼り合わせ回転ディスクを構成することができる。

このように本実施例では、音響光学偏向器の様な高価な部品が不要となり、またビーム光の光強度の減衰がなくS/Nを高くできる。

#### 第10実施例：

図42ないし図44は本発明の第10実施例に係わり、図42は光路長可変光学系の構成を示す図、図43は図42の光路長可変光学系の変形例の構成を示す図、図44は図43の光路長可変光学系の詳細な構成を説明する図である。

第10実施例は、第1実施例とほとんど同じであるので、異なる点のみ説明し、同一の構成には同じ符号をつけ説明は省略する。

#### (構成・作用)

光路長可変光学系9が第1実施例と異なり、本実施の形態の光路長可変光学系9では、図42に示すように、入射SMF8から出射した光は、コリメータレンズ29により入射ビーム190として透過型回折格子ペア188a、188bに入射する。入射ビームに含まれる光の内、回折格子188aでは波長の短い光は回折角が小さく、長い光は回折角が大きいが、回折格子188bは回折格子188aと対向して平行に設けられているため、それぞれの回折光191a、191bは再び入射ビーム190と平行な光線となり、コリメータレンズ36により出射SMF10に導光される。ここで、波長の短い光の光路191aと波長の長い光の光路191bには波長と透過型回折格子ペア188a、188bの回折角 $\gamma$ に応じて光路差が生じるため、波長に応じた位相変化が生じ、伝播時間が変化する。

これを式を用いて説明する。回折格子ペア188a、188bの回折角 $\gamma$ 、ピッチp、回折次数mと、波長 $\lambda$ 、回折角 $\theta$ との関係は、光速c、光の周波数 $\omega$ を用いて、

$$\theta = \gamma - \sin^{-1}(\sin \gamma - 2\pi c p m / \omega)$$

の関係にあり、

回折格子ペア188a、188bを透過した光と、回折格子がなかった場合の光路長の差lは、回折格子ペア188a、188bの間隔Gを用いて、

$$l = G(1 - \cos \theta) / \cos(\gamma - \theta)$$

となり、これは

$$\phi = \omega l / c = \omega l G(1 - \cos \theta) / c \cos(\gamma - \theta)$$

の位相変化を与えることに相当し、

$$t_g = -\partial \phi / \partial \omega$$

の群遅延（伝播時間の変化）を与え、光路長に換算すると

$$\Delta l_g = c \cdot t_g = -c \partial \phi / \partial \omega$$

変化する。

透過型回折格子ペア188a、188bは回転ステージ189に固定されており、波長 $\lambda$ : 1.3  $\mu$ m、波長バンド幅: 60 nm、回折格子ピッチ: 50 mm本、回折次数: 1の場合、回転ステージ189を数度揺動することにより数mmの光路長変化に対応する伝播時間の変化を得られる。電磁コイルと共振振動を用いたレゾナントスキャナ等を用いると、数kHzの高速で数度の揺動を得ることができ、高速な走査が可能である。

（効果）

このように本実施の形態では、第1の実施の形態の効果に加え、構成が簡単なので原価低減になる。また、高速な走査によりリアルタイムでの観察を実現する。

図43は本実施例の変形例であって、図42との相違は透過型でなく、反射型の回折格子ペア192a、192bで構成していることであるが、その他は図42とほとんど同様である。

また、平行に配置された回折格子以外にも、プリズム、音響光学素子（AOM）といった分散素子を対向しても同様の効果が得られる。

図42のような回折格子のペアを用いた構成では回折格子ペアにより導入される位相分散

$$\phi'' = \partial^2 \phi / \partial \omega^2 \quad (\phi: \text{位相}, \omega: \text{角振動数})$$

により、光のコヒーレンス長が、光源のコヒーレンス長を $l_{co}$ とすると

$$l_{co}' \doteq \sqrt{(1 + 15 (1/n)^2 \phi''^2 / (l_{co}/c)^4)} \cdot l_{co}$$

と長くなり、深さ方向の検出分解能を悪化させる。

そこで、図43の具体的な構成として、図44に示すような回折格子300、301とレンズ302、303で構成される分散補償光学系を用いる。レンズ302、303の焦点距離を $f$ 、 $f$ からの回折格子の位置を $Z$ 、回折格子の回折角を $\theta$ 、回折格子のピッチを $N$ とすると、

$$\phi'' = \lambda^3 Z / \pi (c N \cos \theta)$$

ことにより位相分散をある回転角において近似的に 0 にし、コヒーレンス長を光源のコヒーレンス長と同等にすることができる。

また、揺動可能な透過型回折格子ペア 188a、188b と同様に固定された回折格子ペアを設けることによって分散補償を行うこともできる。

この変形例では、図 26 に示した本実施の形態の効果に加え、深さ方向の分解能の劣化を補償できる。

#### 第 11 実施例：

図 45 は本発明の第 11 実施例に係る光路長可変光学系の構成を示す図である。

第 11 実施例は、第 1 実施例とほとんど同じであるので、異なる点のみ説明し、同一の構成には同じ符号をつけ説明は省略する。

##### (構成・作用)

本実施例の光路長可変光学系 9 では、図 4.8 に示すように、入射 SMF 8 から出射した光は、コリメータレンズ 29 により入射ビーム 190 として音響光学素子 (AOM) 193 に入射する。入射ビーム 190 に含まれる光の内、AOM 193 では波長の短い光は回折角が小さく 194a のような光路に、長い光は回折角が大きく 194b のような光路を進む。ここで、色収差を有するレンズ 195 の特に色収差を強く発する光軸から外れた部分を用い、出射 SMF 10 のファイバ端 37 に集光させる。

ここで、波長の短い光の光路 191a と波長の長い光の光路 191b には波長と、AOM の駆動周波数の可変による走査角  $\theta$  (光源中心波長を基準とする) に応じて光路差が生じるため、波長に応じた位相変化が生じ、伝播時間に変化する。

##### (効果)

このように本実施例では、第 1 実施例の効果に加え、AOM 走査周波数は MHz 程度と非常に高速なため、高速な走査が可能になる。また、AOM の駆動周波数を復調用の光ヘテロダインの周波数とすることができる。

#### 第 12 実施例：

第 12 実施例は、第 1 実施例の光カプラ 6，光走査プローブ 20，走査手段 19，走査駆動装置 22 の詳細な構成を示すものである。

“Scanning single-mode fiber optic catheter-endoscope for optical coherence to

mography” Tearney et. al, Optics Letters, p. 543-545, vol. 21, 1996にOCT用の回転走査プローブが開示されている。この回転走査型プローブでは、光ファイバが回転するためのシャフトと一体で回転しているために、回転する光ファイバと固定する光ファイバを接続するための光ロータリジョイントが必要であるが、光ロータリジョイントは非常に高い精度で製作する必要があるため、一般的に高価な上、ファイバ端とファイバ端を離して接続することによる挿入損失と内部反射によるSN比の劣化という問題があった。

これに対し、WO97/32182では、先端部に設けられたミラーを光ファイバと独立した回転シャフトで回転することで、光ロータリジョイントを不要にしているが、このような回転シャフトを生体内に導入するために、フレキシブルシャフトで実現すると、湾曲による抵抗によって回転ムラが生じるという問題点があった。

また、プローブを内視鏡の鉗子口への挿通して用いる場合、内視鏡の湾曲等によってプローブ内の光ファイバの複屈折性が変化し、干渉光強度が変化するという問題がある。

WO97/32182では、観察用ファイバに治療用の高出力レーザ光を導入する例が開示されているが、実際には観察用のファイバはシングルモードファイバであり、数 $\mu\text{m}$ という小さなコア径しか有さないため、治療用レーザを導入するとファイバ自身が損傷し観察に支障を生じたり、治療用レーザの伝送に最適な仕様のファイバを選択することができないという問題がある。

生体に適用するプローブでは、プローブの洗浄・消毒・滅菌、光学特性の劣化に対応する交換のために、観測装置と着脱できることが必要である。

OCTに用いられる低コヒーレンス光源には連続的な発光時間の短いものもあり、非使用時に発光していると光源の寿命を大幅に短縮する。特に不可視光や出力が小さい場合、観察部位から光が出射していること自体に気がつきにくい。

WO97/32182では、観察用ファイバに治療用の高出力レーザ光を導入する例が開示されている。非使用時に発光していると伝送ファイバなどの光学部品が熱を持つことに等より、寿命が短縮する場合もある。

図46において、光カプラ6はコリメータレンズ78a、78b、78c及び偏光ビームスプリッタ(PBS)79により構成され、走査手段19は回転ミラー88、モー



タ 8 9 及びエンコーダ 9 3 により構成され、走査駆動装置 2 2 は 3 相駆動ドライバ 1 0 2 により構成される。

第 3 の S M F 5 より入射された光は偏波コントローラ ( P C ) 7 6 により紙面の上下方向の直線偏光に変換され出射端 7 7 に導かれ、コリメータレンズ 7 8 a により偏光ビームスピリッタ ( P B S ) 7 9 に入射される。 P B S 7 9 は紙面の上下方向の直線偏光は反射せず、透過させるようになっており、 P B S 7 9 を透過した光はコリメータレンズ 7 8 b により S M F 2 1 a を構成する第 1 の偏波面保存ファイバ ( P M F ) 8 0 に入射される。

なお、上記の偏波面保存ファイバ ( P M F ) は、 2 つの直交する偏波面を保存したまま伝搬可能なファイバである。

第 1 の P M F 8 0 はコネクタ 8 2 で第 2 の P M F 8 1 に接続される。コネクタ 8 2 では直交する偏波面を保存したまま接続されるように偏波面の向きが整合されており、第 2 の P M F 8 1 でも紙面に上下方向の直線偏光が維持されている。細い管状のプロープの先端に設けられた第 2 の P M F 8 1 端には G R I N ( 屈折率分布型 ) レンズ 8 5 と 1 / 4 波長板 8 6 が設けられており、レンズワク 8 7 により光透過性のシース 9 2 に固定されている。第 2 の P M F 8 1 より出射した直線偏光は 1 / 4 波長板 8 6 により円偏光に変換される。 G R I N レンズ 8 5 と 1 / 4 波長板 8 6 より出射した光は、回転ミラー 8 8 によりプロープ側方に導光されシース 9 2 を透過して焦点 9 6 に集光する。また、焦点 9 6 近傍に位置する被検体からの反射・散乱光は再び回転ミラー 8 8 により 1 / 4 波長板 8 6 と G R I N レンズ 8 5 を経て第 2 の P M F 8 1 に導光される。この時、被検体からの反射・散乱光は円偏光であり、 1 / 4 波長板 8 6 を透過する際に、紙面に垂直な直線偏光に変換される。ここで、 1 / 4 波長板 8 6 の代わりに偏波面を 4 5 ° 回転させるファラデー回転子 ( F a r a d a y R o t a t o r ) などの旋光性素子を用いても同様の効果が得られる。

第 2 の P M F 8 1 は紙面に垂直な直線偏光も保存して伝搬可能であり、紙面に垂直な直線偏光である被検体からの反射・散乱光は第 2 の P M F からコネクタ 8 2 を介して偏波面を維持したまま第 1 の P M F 8 0 に伝搬される。第 1 の P M F 8 0 から出射した紙面に垂直な直線偏光はコリメータレンズ 7 8 b により P B S 7 9 に入射する。 P B S 7 9 は紙面に垂直な直線偏光のみを図下方に反射するようになっており、第 1 の P M F

80から出射した光は、コリメータレンズ78cを用いて第4のSMF13の端部83に入射し、PC84により直線偏光から任意の偏光に変換され、第4のSMF13を伝搬する。

また、回転ミラー88は回転位置を検出するエンコーダ90を持つモータ89の軸に接続され、モータ89により回転することができる。モータ89、エンコーダ90は先端キャップ91に固定され、更に先端キャップ91は糸巻接着部93によりシース92に固定されている。モータ89の回転により回転ミラー88が回転し、光源からの光の出射および被検体からの反射・散乱光の受光の方向を円周状に走査することができる。

モータ89はブラシレスDCモータであり、3相駆動ドライバ102で駆動制御される。モータ89と3相駆動ドライバ102は3本の駆動ケーブル98a、b、99a、b、100a、bで接続され、それぞれのケーブルはコネクタ82で接続されている。またエンコーダ93と3相駆動ドライバ102は信号ケーブル101a、bで接続されており、信号ケーブルには、A、B相およびZ相（1回転1パルス）の信号がある。3相駆動ドライバはエンコーダ93の信号により回転ミラー88を一定回転し、同時に回転の位相情報を出力する。また、エンコーダ93がなくともモータ回転は3相の駆動信号を制御することによっても、安定して回転できる。モータの回転位相情報は図1のコンピュータ27に入力される。

また、治療用およびマーキング用のレーザダイオード（LD）94が設けることができ、そのレーザ光はレーザ用マルチモードファイバ95aおよび95bによりプローブ先端の第2のPMF81の出射端と近接して設けられる。レーザ光はGRINレンズ85、回転ミラー88により、第2のPMF81の出射光の焦点96の近傍に焦点を持つように、マルチモードファイバ95bの出射端は位置決めされている。レーザの出射はコンピュータ27からの司令に基づき、タイミング回路97により制御される。

図47にコネクタ82の接点部（プローブ側）を示す。第2のPMF81端部およびマルチモードファイバ95bは正確な位置決めのため勘合する位置決め手段103a、bが設けられている。またコネクタ82は横長形状であるため、第1のPMF80と第2のPMF81の偏波面を一致させることができる。

また、コネクタ82には、光走査プローブのコネクタ82へ接続を検知する接続検知手段264が設けられ、接続検知信号266が出力されている。また、3相駆動ドラ

ファイバからは、エンコーダ90または駆動信号からモータ89の走査が一定以上の回転になったことを検知した、走査検知信号267が出力されている。接続検知信号266および走査検知信号267は判定回路265に入力している。接続検知信号266がONになると判定回路265から走査許可信号270が3相駆動ドライバ270に入力され、回転走査を開始する。さらに接続検知信号266および走査検知信号267の両方がONになると、低コヒーレンス光源1に低コヒーレンス光源出射許可信号269が、またLD94にレーザ駆動許可信号268が入力される。LD94はタイミング回路97からレーザ出射が司令されても、レーザ駆動許可信号268が入力されていない場合は出射しない。

プローブが観測装置に装着され、回転走査が行われている時のみ低コヒーレンス光源を駆動することで、低コヒーレンス光源の寿命を延ばすことができる。

また、プローブが観測装置に装着され、回転走査が行われている時のみレーザ光を駆動することで、ファイバや光学部品の熱等による光学系の損傷を防止することができる。

さらに、先端モータによる回転のため、フレキシブルシャフトを用いる方式に対してコネクタ部を簡単に構成できる。また、フレキシブルシャフトとシース間の摩擦などの変動負荷がないため、回転を安定させることができる。

また、高SNで、回転ムラのないラジアル走査型プローブおよび観測装置を提供すると共に、電気系と、光学系を同時に簡便に接続できる。

また、信号用シングルモードファイバ(SMF)では伝達できない強力な治療用のレーザ光を導光することができる。

さらに、通常の光カプラを用いる場合には、プローブへの導光、またプローブからの戻り光の伝送にそれぞれ1/2、合計3/4の損失が避けられないが、偏波コントローラ、PBS、PMF、1/4波長板(または旋光子)の組み合わせにより、高効率で伝送が可能である。

また、プローブ内で光伝送にPMFを用いることにより、プローブの湾曲によってファイバ内の偏光状態が変化し、検出に影響を与えることがない。

図48を用いて、図46の治療用およびマーキング用のレーザダイオード(LD)94によるOCT画像中のターゲットにレーザ治療・マーキングを行なう方法を説明す

る。

図48に示すように、回転ミラー88の回転を停止してディレイライン9により伝搬時間を変化させると、プローブから出射したビームの深さ方向の1次元的な情報が干渉信号として得られる。それを連続的に回転ミラー88を回転させながら高速に深さ方向に走査し、その情報を円周状に表示すると符号109のような画像が得られる。回転中心○から放射状に伸びる直線が回転ミラー88がその方向に向いた位置での深さ方向の情報を示す。

図48を参照し、図49を用いて画像上に表示された患部105をレーザ焼灼する場合の手順を説明する。ステップS1で、術者がモニター上で患部105を特定し、レーザ照射範囲106をマウス・トラックボール等の入力装置でコンピュータ27に指示する。

次に、ステップS2で、コンピュータがレーザを照射すべき回転ミラー88の角度範囲 $\theta_{\text{area}}$ を算出し、タイミング回路97に司令を出す。

そして、ステップS3で、回転ミラー88の角度が $\theta_{\text{area}}$ になったら、タイミング回路97がレーザダイオード(LD)94を駆動し、レーザを患部に照射する。

また、マーキングを行なう場合、術者がモニター上でマーキングしたい方向を入力手段によりマーカ107で指示する。前記同様にレーザ出射角度 $\theta$ を算出し、光出射方向が直線108の方向になったら、タイミング回路97によりLD94を駆動し、レーザを患部に照射し、マーキングする。

画像上で正確に治療範囲・マーキングの位置を正確に位置決めすることで、治療の精度向上、マーキングガイドによる生検の精度向上を行える。

図50に図1の構成で、光路長可変光学系9により光伝播時間を変化させながら、被検体の深さ方向に対応して得られた干渉信号を復調器24で復調し、ADコンバータ25でコンピュータ27に取り込まれた信号183を示す。図50の横軸にプローブ表面からの距離(プローブと被検体が接触している場合被検体の表面からの深さ)が示され、縦軸に信号強度を対数で表示される。被検体からの反射・散乱は、被検体からの深さと被検体の主として散乱係数(副次的に吸収係数等の光学特性)に関連する係数の積に対して指数関数的に減衰する。図50の縦軸は対数で表示されているため、指数関数的な減衰は、被検体の散乱および吸収係数に関連する係数の積に比例する傾きを有する

直線で示される。

図50に示されるように、深さ2mmまでは緩やかな減衰183aであるが、深さ2mmから3mmは例えば被検体が生体である場合、上皮組織から粘膜下組織への移行によって大きな減衰183bに変化し、同様に深さ3mmから4.5mmでは極めて小さな減衰183c、4.5mm以深では中程度の減衰183dへと変化する。

このような減衰のある場合、走査面を図48に示すように2次元的に表示する場合、この信号強度をそのまま画像上の濃淡、例えば強度の高いところを明るく表示すると、当然浅いところは明るく、深いところは暗くなり、画像上に表示された微細な構造による明暗が観察しにくくなる。

これを補償するひとつの方法として直線184に示されるように、全体の減衰を一定として想定し減衰を補償する方法も考えられるが、被検体、特に生体では183b～183dに示されるように深さに応じて減衰量が一定でないので補償が効果的にならない。また生体では減衰量は部位、固体差があるので補償量は一定にならない。

図51に特に生体で効果的に信号強度を補償する方法を示す。図5.1に示されるように、各深さを全走査範囲に対して数点に均等分割（図では1mm毎）し、各点での補償量を操作者が例えば観測装置に設けられたレバーにより補償値（図では0.7～6：符号187a～187e）を観測画像を見ながら設定する。その補償値に対応するゲイン値（図では3.5dB～30dB）を対数上で加算する、または図1の復調器24のゲインをゲイン値に対応して変化させることにより、符号185で示されるように信号を略一定に補償でき、それにより微細な構造による明暗が観察しやすくなる。

つまり、簡便に被検体内部の散乱等光学特性の不均一性に対応して減衰を補償し、微細な構造による明暗の変化を観察しやすくする。

### 第13実施例：

図52は本発明の第13実施例に係る光走査プローブ及び走査手段の構成を示す図である。

WO97/32182では、先端部に設けられたミラーを光ファイバと独立した回転シャフトで回転し、光ファイバから出射した光をレンズと直角プリズムを用いて回転しているミラーに導き、走査を行っているプローブが開示されているが、内視鏡に挿通するプローブでは内視鏡への湾曲によりプローブ本体と、ミラーを回転支持している

回転シャフトに相互移動が起き、そのため回転ミラーのプロープ軸方向へのブレが生じ、これはもっとも分解能が高く、検出コントラストも高いレンズの結ぶフォーカス位置を不定にするため、使い勝手が悪い。

また、ミラーのプロープ軸方向へのぶれは光路長の変化を起こすため、再構成された2次元画像かぶれにより正確な形状・大きさを示さなくなるという問題を有する。

また、WO97/32182では、先端部に設けられたミラーを光ファイバと独立した回転軸で回転し、光ファイバから出射した光をレンズと直角プリズムを用いて回転しているミラーに導き、走査を行っているが、レンズから被検体までの距離が遠くなるため、レンズのNAを大きくできず、集光スポットが大きくなり、光軸に垂直な方向の分解能が低くなるという問題点がある。さらに先端部全体の小型化が困難である。

第13実施例は、第12実施例とほとんど同じであるので、異なる点のみ説明し、同一の構成には同じ符号をつけ説明は省略する。

#### (構成・作用)

本実施例では、図52に示すように、図7の構成との相違は、第1に図46における走査手段では回転ミラー88をプロープ先端に設けられたモータ89で駆動しているのに対し、図52における走査手段ではベアリング119で支持された回転シャフト115により駆動しており、モータ89およびエンコーダ90をプロープ側でなく、装置本体側に設けていることである。モータ89の回転は装置側の着脱コネクタ110に設けられたカプラ受け112と、着脱コネクタ110のプロープ側に設けられたカプラ111により、カプラ111に設けられた伝達ピンを介して、回転シャフト115伝達される。カプラ111は着脱コネクタ110にベアリング113により回転自在に保持されている。

第2の相違は、図46では回転ミラー88と、GRINレンズ85と1/4波長板86が対向して配置していたが、図52では平行に配置されるために、光路を折り返すための直角プリズム117と、1/4波長板86と、2分割されたGRINレンズ116a, 116bを先端キャップ118に設けている点である。それ以外は図7と同様である。

なお、以上の、図52で示されたPMFの代わりにSMFを用いることも当然可能である。

(効果)

このように本実施例では、第12実施例の効果に加え、モータおよびエンコーダをプローブ側でなく装置本体側に設けることで、プローブを安価に製造可能となり、かつ、信号用シングルモードファイバ(SMF)では伝達できない強力な治療用のレーザ光を導光することができる。

また、プローブ内で光伝送にPMFを用いることにより、プローブの湾曲によってファイバ内の偏光状態が変化し、検出に影響を与えることがない。

また、高SNで、安価で、高分解能・高コントラストで観察できる範囲を一定にし、操作性を向上できる。

また、集光レンズのNAを大きく取れ、分解能が向上できる。また、プローブ先端部を小型に構成できる。

第14実施例：

図53ないし図55は本発明の第4実施例に係わり、図53は光走査プローブ及び走査手段の構成を示す図、図54は図53の走査手段の変形例の構成を示す図、図55は図53、図54のGRINレンズを光軸方向から見た図である。

第14実施例は、第13実施例とほとんど同じであるので、異なる点のみ説明し、同一の構成には同じ符号をつけ説明は省略する。

(構成・作用)

第13実施例との相違は、図53に示すように、回転ミラー88の代わりに回転プリズム121を設け、その裏面に誘電多層膜などの反射コートを設けた反射面122を設けていることである。

この場合、第13実施例の図52で示した光路を折り返すための直角プリズム117のような手段が不要で、回転プリズム121および回転シャフト115を回転自在に支持するベアリング119を支持する固定部材125に図1で示される第4のSMF21およびGRINレンズ120を設け、GRINレンズ120から出射した光は反射面122で反射して、端部を半球状に加工された光透過性の先端キャップ129を透過して焦点96に集光する。

被検体からの反射散乱光は逆に光路を進み、第4のSMF21に入射する。ここで、第4のSMF21端部およびGRINレンズ120の入射面124aと、GRINレン

ズ120の出射面124bは界面反射による戻り光を防止するため略平行に光軸に対し斜め研磨されている。また、回転プリズム121の入射面123も同様の理由で光軸に対し斜め研磨されている。

また、図54は、本実施例の変形例であって、図52の回転プリズム121の代わりに回転シャフト115側に反射面128を設けた回転ミラー127を設けて構成される。回転ミラーの位置を保持するために、フランジ形状の滑り部材126が設けてある。

また、図55は、図53、図54のGRINレンズ120を光軸方向から見た図であり、十分なNAを確保したままプローブの径方向に対して小型に配置するために、上下方向を平らに研磨し、偏平形状にしている。

(効果)

このように本実施例では、第13実施例の効果に加え、光路を折り返す必要性がないため、プローブ先端部を細径化でき、また先端硬質長を短縮できる。

第15実施例：

図56及び図57は本発明の第15実施例に係わり、図56は光走査プローブ及び走査手段の構成を示す図、図57は図56のA-A線断面を示す断面図である。

第15実施例は、第1実施例とほとんど同じであるので、異なる点のみ説明し、同一の構成には同じ符号をつけ説明は省略する。

(構成・作用)

第12ないし第14実施例では、光走査プローブ先端に設けられた回転ミラー等の光学素子の回転により、円周状に光ビームの走査を行い、また円周状の画像を得るものであったが、本実施例は光学素子を直線状に移動することによりプローブ側方の画像を得るものである。

すなわち、本実施例の光走査プローブでは、図56に示すように、第1のPMF80の端部は進退シャフト132のファイバ接続部137に固定され、第2のPMF82の一端はファイバ接続部137と対向するフェルール13Bに固定されている。ファイバ接続部137とフェルール138は着脱可能でかつ円柱状の側面で勘合されており、その位相関係は回り止め139と回り止め受け140により保たれている。ファイバ接続部137とフェルール138は接続シャフト144に設けられ軸142を支点として回転可能な取付レバー141と、取付レバー141先端に設けられたツメ151と、進



退シャフト132に設けられツメ151と懸合する凹部152と、バネ143により、着脱可能である。取付レバー141は図示しないバネにより軸142を支点として進退シャフト132に対して圧接されている。また接合時にはファイバ接続部137とフェルール138がバネ143の弾性力により圧接し、第1のPMF80と第2のPMF82が、偏波面を保持しながら確実に接合される。

第2のPMF81の他端はレンズ枠156に保持され、GRINレンズ85に接続される。GRINレンズ85には1/4波長板86、プリズム157が接合されており、第2のPMF81から出射した光はGRINレンズ85により集光され、1/4波長板86を透過し、プリズム157で側方に反射され、光透過性のシース147を透過して焦点96に集光する。

被検体を反射・散乱した光は、逆の光路を通過して第2のPMF81に導光される。レンズ枠156は、望ましくは多層多条の金属コイルで構成される中空のフレキシブルシャフト148の一端に固定され、フレキシブルシャフト148の他端は接続シャフト144に固定されている。また、シース147の端部はコネクタハウジング145に固定されている。

コネクタハウジング145は、装置側に設けられた回転リング153に取付ナット146により着脱自在に取り付けられる。コネクタハウジング145と回転リング153には図示しない回り止めの突起と対応する凹部がそれぞれ設けられている。

回転リング153は観測装置ハウジング154に回転自在に保持されている。回転リング153と観測装置ハウジング154の間には圧縮されたOリングによる摩擦部材155が設けられ、手動で回転リング153を回すことはできるが、シース147がねじられた程度のトルクが伝達されて回転しない様に設定されている。

この回転リング153を回転することで、シース147及びフレキシブルシャフト148を任意の方向に回転させることができる。シース147は、内視鏡の鉗子挿通穴に挿通した場合など摩擦により先端はほとんど回転できないが、フレキシブルシャフト148はシース内に摩擦の小さい状態で保持されているので、自在に回転可能である。

また、進退シャフト132は、回転リング153に設けられたリニアベアリング133と進退シャフト132に設けられたV字溝134により、図の左右に摺動自在である。この摺動部のA-Aで示される断面を図20に示す。

リニアベアリング133のボールとV字溝134により、図56の左右方向には摺動自在であるが、図57の回転方向には規制されている。

また、進退シャフト132の端部はベアリング131により回転自在に駆動軸136に接続され、駆動軸136は駆動軸136を左右方向に移動させるリニア駆動ステージ135に接続されており、その駆動位置はコンピュータ27により制御される。

コンピュータ27により駆動制御信号がリニア駆動ステージ135に送られ、その移動は駆動軸136とベアリング131により進退シャフト132に伝達される。また、進退シャフト132の左右への移動はフェール138、バネ143、取付レバー141、接続シャフト144、フレキシブルシャフト148に伝達され、最終的にはレンズ枠156、GRINレンズ85、1/4波長板86、プリズム157からなる先端光学ユニットを左右に移動させ、観察光を左右に走査し、ディレイライン9による深さ方向の走査と合わせ、深さ方向と横方向の2次元的な画像化を可能にしている。

この先端部の走査範囲158は、リニア駆動ステージへの制御入力により規制されると共に、コネクタハウジング145に設けられた突起150と、接続シャフト144に設けられた規制部材149a、149bによっても規制されている。

これらの制御的および機械的規制は、シース147の湾曲による、シース147とフレキシブルシャフト148の相対的進退の影響を含めても、プリズム157がシース147先端に接触しないように設定されている。また、制御的規制の範囲は機械的な規制の範囲内に設定されている。また、上記機械的規制部材はプローブコネクタのみならず、観測装置本体側の進退シャフト132と回転リング153との摺動範囲を規制したり、プローブ先端のシース147およびレンズ枠156に機械的規制部材を設けてもよいことは自明である。

また、上記走査範囲で移動しても、第1のPMF80に過剰な張力がかからない様、たるみループ130が設けられている。

以上の、図56で示されたPMFの代わりにSMFを用いることも当然可能である。また、その場合には1/4波長板86を除くことができる。

(効果)

このように本実施例では、第1実施例の効果に加え、機械的規制手段を持つことにより、プローブ先端にあるプリズム等の光学素子がシース内部に当たり、破損、光学的

劣化をするのを防止する。特に、コネクタ側に規制手段を設けた場合、観測装置本体から取り外した場合に移動するのを防止できる。

また、リニア走査において、フレキシブルシャフトを希望の方向に回転し、保持できるため、プローブが内視鏡の鉗子口など摩擦の大きいものに挿入されていても、走査平面を希望の位置に設定できる。

なお、図56の構成では、プローブ全体とフレキシブルシャフトを一体に回転する構成になっているが、プローブのシースの回転を固定し、フレキシブルシャフトのみが回転するような構成にしても、同様に走査平面を希望の位置に設定でき、図56の構成と同様の効果を有する。

#### 第16実施例：

図58ないし図62は本発明の第6実施例に係わり、図58は光イメージング装置の要部の構成を示す構成図、図59は図58の光走査プローブの第1の変形例を説明する図、図60は図58の光走査プローブの第2の変形例を説明する図、図61は図58の光走査プローブの第3の変形例を説明する図、図62は図61の固定ミラーを含む光軸に沿った断面を示す断面図である。

第16実施例は、第12実施例とほとんど同じであるので、異なる点のみ説明し、同一の構成には同じ符号をつけ説明は省略する。

#### （構成・作用）

図58に示すように、本実施例では、図1の光カプラ6の代わりに光サーキュレータ159が設けられている。光サーキュレータ159は、第3のSMF5からの光を高い効率で第7のSMF160に導光し、また第7のSMF160に伝送された光を高い効率で第4のSMF13に伝送し、また第3のSMF5と第4のSMF13が高度にアイソレートされているものである。

光カプラ6を用いた場合、第7のSMF160に導かれた光が100%戻ってきたとしても、第4のSMF13に伝送されるのは第3のSMF5からの光の最大1/4であるのに対し、光サーキュレータ159を用いた場合、一般には効率を倍以上向上できる。

光源光は第3のSMF5から光サーキュレータ159を通し、第7のSMF160に導光される。第7のSMF160端部から出射した光は、光走査プローブ内において、

コリメータレンズ166a、偏光板167、コリメータレンズ166bを通り第3のPMF168に導光される。偏光板167と第3のPMF168の偏波面の一方は一致している。第7のSMF160端部およびコリメータレンズ166aは固定部材161に固定されており、偏光板167と第3のPMF168は回転体165に固定され、固定部材161と回転体165はベアリング163により回転自在に接続されている。

この時、第7のSMF160から出射した光は円偏光になるように第7のSMF160に設けられた図示しない偏光コントローラ(PC)により制御され、第3のPMF168に安定した光量が伝送されるようになっている。

また、光走査プローブでは、回転体165はベルト164により回転駆動することができるようになっている。第3のPMF168は、第4のPMF169と第3のPMF169の端部が固定されているカブラ171を介して着脱可能に接続されている。回転体165とカブラ171から構成されるコネクタ部170には図示しない着脱用ネジと回転規制部材が設けられており、第3のPMF168と第4のPMF169の偏波面が一致するように接続される。

カブラ171には望ましくは多条多層のコイルからなるフレキシブルシャフト148が接続され、第4のPMF169の他端およびそれに密着して設けられたGRINレンズ85・プリズム157はフレキシブルシャフト148の他端とともにレンズワク156に接続・固定される。またフレキシブルシャフトおよびGRINレンズ85などの光学部材は光透過性のシース147の内部に回転自在に設けられている。

第3のPMF168に導光された光は、コネクタ部170で偏波面を保存した状態で第4のSMF169に伝送されプローブ先端部でGRINレンズ85により集光され、プリズム157により略直角に方向を転換し、プローブの側方に光を出射する。ベルト164の駆動力により回転体165が回転し、その回転がコネクタ部170によってフレキシブルシャフト148に伝達され第4のPMF169、GRINレンズ85、プリズム157が一体的に回転し、光の出射方向が走査される。光の出射方向にある被検体からの反射・散乱光はプリズム157、GRINレンズ85によって第4のPMF169に導光され、第4のPMF169、第3のPMF168を伝送され、再びコリメータレンズ166b、偏光板167を通り、コリメータレンズ166aにより第7のSMF160端部に導光される。

このとき第3のPMF 168と偏光板167の偏波面は一致しているため、偏光の不一致により減衰することなく、第7のSMF 160端部に伝送される。第7のSMF 160に伝送された被検体からの反射・散乱光は光サーキュレータ159により第4のSMF 13に伝送される。

(効果)

このように本実施例では、プローブ内で光伝送にPMFを用いることにより、プローブの湾曲によってファイバ内の偏光状態が変化し、検出に影響を与えることがない。

ラジアル走査型プローブの詳細構成がWO 97/32182に示されているが、プローブ先端部にはレンズ枠、GRINレンズ、プリズムなどの先端光学系があり、細径の内視鏡を用いた挿入や、循環器・血管分野の使用で求められる小型化が困難で、また組立調整も複雑で工数を要するという問題があった。またこの構成では、ファイバ出射端とレンズ、レンズとプリズムなどの接合部で反射が生じ、SN比低下の原因となるという問題点を有する。

なお、図58のフレキシブルシャフト148の代わりに、図59に示すように、コア172とクラッド173からなる光ファイバの外側に、光透過性のシース175と回転摺動性が向上するように凹凸が設けられた、また回転力が伝達可能なように高剛性の繊維入りポリマーなどで構成されたジャケット174を設けてもよい。コアと直接溶融された球状のレンズ176の一部に反射膜コーティングを施した反射面177を設けている。ファイバのコア172より出射した光は反射面177により略直角に曲げられ、球状のレンズ部176により、集光点96に集光される。ファイバはPMFでもSMFでも可能である。

図59のように構成することで、部品点数が少なく、組立部分も少なく安価に製作可能となる。また、レンズ、プリズムの張り合わせ、レンズ枠等の接合がなく、非常に小さく製作でき、細さの要求される血管用に向いている。

また、図59の球状レンズ176の代わりに、図60に示すように、光ファイバ端部にコア拡大部178を設け、GRINレンズまたは屈折率分布方ファイバ179を溶融して接続し、その端部を斜め研磨した反射面177を有して構成してもよく、図59よりさらに小型化が可能となる。

USP 532150に示されるOCT用の回転走査プローブでは、プローブの側方

の画像を得ることができるが、一般の内視鏡のように、プローブの前方の断層像を得ることができない。そこで、同じくUSP 5 3 2 1 5 0にプローブの前方の断層像を得ることの出来る例が開示されている。しかし、これらの例では前方を走査するのに、ピエゾ素子やファイバ束によって走査しているため、ラジアル走査の方法と駆動方法が全く異なり、前方と側方の画像を切り替えたい場合は、プローブを交換するだけでなく、観測装置の交換が必要であり、煩雑であり高価であるという問題を有する。

さらに、図6 1及び図6 2に示すように、図5 8の光走査プローブの変形例としてプリズム1 5 7の出射方向に対向して固定ミラー1 8 0が設けられ、固定ミラー1 8 0によりプリズム1 5 7から出射した光が偏向され観察ビーム1 8 2はプローブ前方に出射し、フレキシブルシャフト1 4 8、レンズワク1 5 6、プリズム1 5 7の回転に応じ軌跡1 8 1のように走査されるように構成してもよい。この場合、ラジアル走査と同じ構成を用いてプローブの前方への直線状の走査を実現でき、簡便である。

本実施例の構成によりラジアル走査型と走査手段および観測装置を共有出来る前方走査プローブ手段を提供できる。

#### 第1 7実施例：

図6 3ないし図6 8は本発明の第1 7実施例に係わり、図6 3は光イメージング装置の構成を示す構成図、図6 4は図6 3の光イメージング装置に用いられる光走査プローブの先端の光学系の構成を示す図、図6 5は図6 3の光イメージング装置に用いられる光走査プローブの先端の光学系の変形例の構成を示す図、図6 6は図6 3の2つの低コヒーレンス光源を合波し光源のスペクトル幅を拡大する構成を示す図、図6 7は図6 3の2つの低コヒーレンス光源を合波し最終的にガウシアン分布を得るための構成を示す図、図6 8は図6 6の光源の合波を更に高効率で実現する例に説明する図である。

第1 7実施例は、第1実施例とほとんど同じであるので、異なる点のみ説明し、同一の構成には同じ符号をつけ説明は省略する。

#### (構成・作用)

本実施例の光イメージング装置では、図6 3に示すように、中心波長 $\lambda_1$ の低コヒーレンス光源2 0 2 aと、中心波長 $\lambda_2$ の低コヒーレンス光源2 0 2 bがWDM (Wavelength Division Multiplexer) 2 0 3で合波される。WDMは光カプラの波長による合波特性を利用しており、高い効率で合波することが可

能である。この2つの光源の合成光が図1の低コヒーレンス光源1に対応する。

図1の光路長可変光学系9に相当して、光分岐部204および反射ディレイライン部205が設けられている。光分岐部204は偏光を用いて入射SMF8から第8のSMF206に高効率で導光し、反射ディレイライン部205からの戻り光を高効率で出射SMF10に導光することによって、反射型ディレイラインを用いて、マッハツェンダ型干渉系の伝播時間変化手段として用いることができる。

光分岐部204では、偏波コントローラ(PC)7により偏光を制御し入射SMF8から出射した紙面の上下方向の直線偏光をコリメートレンズ78aを用いて偏光ビームスプリッタ(PBS)79に入射する。PBS79は上下方向の直線偏光を高効率で透過し、1/4波長板86に入射し、円偏光に変換され、コリメートレンズ78bにより、第8のSMF206に導光される。第8のSMF206に入射した光はWDM203bで、中心波長 $\lambda_1$ の低コヒーレンス光源202aに対応する光は第9のSMF207aに分波され、中心波長 $\lambda_2$ の低コヒーレンス光源202bに対応する光は第10のSMF207bに分波される。

第9のSMF207aに分波された光は、コリメータ208a、回折格子209a、レンズ210a、ガルバノミラー211aにより構成される第1のディレイライン262aによって伝播時間を変化させられ、再び第9のSMF207aに戻る。第9のSMF207aより出射した光はコリメータ208aにより回折格子209aに入射し、回折格子209aで分光された光は、レンズ210aにより、レンズ210aのフーリエ平面上に設けられたガルバノミラー211aを走査軸261aを中心に揺動することにより伝播時間を変化させられ、再び第9のSMF207aに戻る。揺動によって伝播時間が変化すると同時に、走査軸261aが中心波長 $\lambda_1$ の光路からのずれ量によって、揺動による光路長が変化が生じ、走査軸261aが中心波長 $\lambda_1$ の光路からのずれ量と揺動の速度を関数としてドップラー周波数が生じる。

同様に、第10のSMF207bに分波された光は、コリメータ208b、回折格子209b、レンズ210b、ガルバノミラー211bにより構成される第2のディレイライン262bによって伝播時間を変化させられ、再び第10のSMF207bに戻る。

この時、第1のディレイライン262aによって生じる中心波長 $\lambda_1$ の光のヘテロ

ダイソニ周波数と、第2のディレイライン262bによって生じる中心波長 $\lambda_2$ の光のヘテロダイソニ周波数は、中心波長の光路からのガルバノミラーの走査軸のずれ量と揺動の速度を設定することにより、それぞれ独立した周波数を設定することが可能で、さらに独立した深さ方向の走査範囲を設定することが可能である。

第9のSMF207aおよび第10のSMF207bに戻った光は、WDM203bにより合波され、第8のSMF286に伝達される。第8のSMF286からコリメータレンズ78bに出射した光は154波長板86により円偏光から紙面に垂直な直線偏光に変換される。PBS79は紙面に垂直な偏光をコリメータレンズ78cの方向に高効率で反射し、出射SMF10に伝送する。光分岐部204は以上の構成により入射SMF8から高効率にディレイライン部20に光を伝送し、またディレイライン部205からの戻り光を出射SMF10に伝送する。

上記光分岐部204は光サーキュレータにより同様の高効率を実現することができる。

図63での構成における、光走査プローブ20、走査手段19、走査駆動装置22に当たる構成は、先端の光学系が図64のようにになっている以外は、第16実施例である図58に示されるものと同様である。

すなわち、図64に示すように、第4のPMF169から出射した光は、第4のPMF169出射端と共にレンズ枠156に保持されたダブルットのアポクロマトレンズ213により集光され、プリズム157により方向を転換される。アポクロマトレンズ213は、中心波長 $\lambda_1$ の光および中心波長 $\lambda_2$ の光両方に対して色収差が最低になるように設計されており、そのためそれぞれの波長に対して一致した焦点を持つ。

また図65のような構成を取ることもできる。図65では図64のアポクロマトレンズ213に対し、低分散GRINレンズ214を用いて図64と同様の効果を得ている。低分散GRINレンズ214は中心波長 $\lambda_1$ の光および中心波長 $\lambda_2$ の光両方に対して低分散の材料を用いて構成されたGRINレンズで、中心波長 $\lambda_1$ の光および中心波長 $\lambda_2$ の光両方に対して色収差が小さく、それぞれの波長に対してほぼ一致した焦点を持つ。

光走査プローブ20およびディレイライン部205からの戻り光を光カプラ14で干渉させ、ディテクタ7、ディテクタ18および差動アンプ23により光ヘテロダイソニ



周波数で変調された干渉信号が電気信号に変換される。中心波長 $\lambda_1$ の光と中心波長 $\lambda_2$ の光はディレイライン部205の第1のディレイライン262aと第2のディレイライン262bの設定によりそれぞれ異なった光ヘテロダイン周波数を有している。ここで、それぞれの光ヘテロダイン周波数に対応したバンドパスフィルタ、またはロックイン検出器によって構成される復調器212a、212bによってそれぞれの波長に対応する信号を独立して検出し、ADコンバータ25によりコンピュータ27により取り込むことができる。

また、復調器を2つ設けずに、差動アンプ23からの出力をAD変換し、フーリエ変換して取り出しても同様の出力が得られる。

#### (効果)

このように本実施の形態では、第1の実施の形態の効果に加え、同時に、実時間で複数の波長によるOCT信号を検出できる。また、上記により、複数の波長による信号を比較・演算することで、波長の違いにより検出可能な代謝を反映した検出を行える。

さらに、可視光から1.5  $\mu\text{m}$ 程度の近赤外光では、生体を被検体とする場合、波長が長いほど、光の散乱・吸収による減衰が少なくなる、また波長が短いほど分解能を上げることができるため、表面付近では波長の短い光を用い、深い部分では波長の長い光を用いることで、浅い部分では分解能を優先し、深い部分ではコントラストの向上を行える。この時、図64、図65で示される光走査プローブ先端での色収差補正を行わない方が効果が高い。

なお、上記は3つ以上の波長の光源を有する場合にも、ディレイラインおよび復調器を対応した数の分だけ増加させることにより全く同様に、同時に複数波長の情報を検出できるのは自明である。

また、それぞれの光源の波長が近接していて、一つのディレイラインにより伝播時間を変化させられる場合は、複数のディレイラインを用いずに構成可能である。この場合には、コリメートレンズ208aおよびレンズ210aをそれぞれの波長に対して色収差を最小化したアポクロマトレンズを用いると良い。この時はそれぞれの光源の中心波長 $\lambda_1$ と $\lambda_2$ は回折格子による分光によりガルバノメータミラー上の異なった位置にあるため、一般的には異なった光ヘテロダイン周波数を持つためである。

光源の結合の方法はWDMでなく、一般的な光カプラを用いても良い。

また、複数の光源を結合するのではなく、バンド幅の大きい光源を波長フィルタにより波長を分割して用いても同様の効果が得られる。

ここで、図63に示されるような2つの光源を合波することによって、光源のスペクトル幅を拡大し、それによってコヒーレンス長を短縮し、深さ方向の分解能を向上させる例について説明する。

OCTにおいて深さ方向の分解能を決定するのは、主として低コヒーレンス光のバンド幅であり、低コヒーレンス光のスペクトル分布がガウシアン型であるばあい、光源の中心波長を $\lambda_0$ 、半値バンド幅を $\Delta\lambda$ 、とすると、

深さ方向の分解能 $\div$ コヒーレンス長 $= 2 (1/\ln 2) \lambda_0^2 / \pi \Delta\lambda$ で示され、

バンド幅が広いほど深さ方向の分解能が良くなる。

しかし、バンド幅は、低コヒーレンス光源を構成するSLD（スーパーミネセンスダイオード）やファイバASE（自己発光）光源などデバイス自身による制限があり、また一般にバンド幅を広げようとする、光源出力が低下してSN比が低下するという問題があり、単一の光源で高分解能と高出力（ $\div$ 高SN比）を実現するのは困難である。さらに、光源のスペクトル形状がガウシアン形状でない場合、コヒーレンス長以外の部分でも干渉信号が得られるため、深さ方向の分解能の低下やSN比の低下が起きるという問題がある。

図66に2つの光源を合波し、光源のスペクトル幅を拡大する構成を示す。符号217aに示されるスペクトル分布を有する低コヒーレンス光源A215aと、符号217bに示されるスペクトル分布を有する低コヒーレンス光源B215bを波長依存カプラ216により合波し、出射SMF219に伝送する。この波長依存カプラ216の同じ導波路への分岐比は符号218に示されるように、低コヒーレンス光源Aの中心波長 $\lambda_0 + \lambda_a$ では小さく、低コヒーレンス光源Bの中心波長 $\lambda_0 - \lambda_a$ では大きい。

これにより、低コヒーレンス光源A215aから出射SMF219および低コヒーレンス光源B215bから出射SMF219への伝達効率は通常の3dB光カプラに対して高くなり、高効率で伝達出来る。

合波された光のスペクトルを符号220に示す。符号220に示されるように合波された後に波長に対して強度がガウシアン分布に近似されるように、合波する低コヒーレンス光源A215a、B215bのスペクトル分布217a、217bおよび波長依

存カプラ 2 1 6 の分岐比 2 1 8 を設定する必要がある。光源のスペクトル分布がガウシアン形状から離れると、コヒーレンス長の範囲以外の部分からの光信号を得、ノイズの原因となる。

しかしながら、低コヒーレンス光源 A 2 1 5 a、低コヒーレンス光源 B 2 1 5 b のスペクトル分布 2 1 7 a、2 1 7 b および強度が理想的でない場合も存在する。図 6 7 にそのような場合にも最終的にガウシアン分布を得るための構成を示す。低コヒーレンス光源 A 2 1 5 a と波長依存カプラ 2 1 6 の間に波長フィルタ 2 2 1 a を設ける。波長フィルタ 2 2 1 a として 2 つのファイバコリメータ間に設けられた誘電多層膜フィルタやファイバグレーティングを用いることができる。また波長フィルタ 2 2 1 a の代りに 2 つの光源の出力をバランスさせるための ND フィルタ等で構成される減衰器を設けてもよい。

更に、波長依存カプラ 2 1 6 の後に波長フィルタ 2 2 1 b を設け、波長フィルタ 2 2 1 a と波長フィルタ 2 2 1 b の調整により最終的なガウシアンスペクトル形状を得ることができ、コヒーレンス長の範囲以外の部分からのノイズを抑制できる。

また、このフィルタは当然低コヒーレンス光源 B 2 1 5 b 側にも設けることができる。また、図 6 7 の構成を図 1 の低コヒーレンス光源 1 に設けるだけでなく、同様の波長フィルタを物体側光路または参照側光路に設けることで同様の効果を得ることができる。

このようにすることにより、光源のスペクトル幅を拡大し、それによってコヒーレンス長を短縮し、深さ方向の分解能を向上させることが可能となる。

次に、図 6 6 の光源の合波を更に高効率で実現する例に説明する。図 6 8 に示すように、低コヒーレンス光源 2 1 5 a からの光を偏波面コントローラ (PC) 2 2 2 a を用いて、紙面の上下方向の直線偏光に変換し、出射端 2 2 4 a からコリメータレンズ 2 2 3 a により偏光ビームスプリッタ (PBS) 7 9 に入射する。PBS 7 9 は紙面の上下方向の直線偏光を高効率で透過し、コリメータレンズ 2 2 3 c により出射ファイバ 2 1 9 に伝送される。同様に低コヒーレンス光源 2 1 5 b からの光は PC 2 2 2 b により紙面に垂直な直線偏光に変換され、出射端 2 2 4 b からコリメータレンズ 2 2 3 b により PBS 7 9 に入射する。PBS 7 9 は紙面の垂直方向の直線偏光を高効率で反射し、コリメータレンズ 2 2 3 c により出射ファイバ 2 1 9 に伝送される。

図66および図67の構成では、波長依存カプラを用いても50%を大幅に超える効率で合波することは困難だが、図68の構成ではさらに高い効率で合波可能である。

#### 第18実施例：

図69ないし図71は本発明の第18実施例に係わり、図69は光走査プローブの先端光学系の構成を示す図、図70は図69の光走査プローブの先端光学系の第1の変形例の構成を示す図、図71は図69の光走査プローブの先端光学系の第2の変形例の構成を示す図である。

第18実施例は、第12実施例とほとんど同じであるので、異なる点のみ説明し、同一の構成には同じ符号をつけ説明は省略する。

先端部に集光系を有するOCTプローブでは、先端集光系のフォーカス位置から被検体の観察したい場所が離れると光軸に対し垂直な方向の分解能が急激に悪化し、また集光量の低下によりコントラストが低下する。このため正確に被検体をフォーカス位置に位置決めする必要がある、特に生体内で用いる場合使い勝手が悪い。これを防止するため、集光系のNAを下げると、フォーカス位置でのスポットサイズが大きくなり、深さ方向分解能に対し、光軸に垂直な方向の分解能が大幅に下がるという問題点がある。

#### (構成・作用)

第12実施例で示された光走査プローブ20の先端光学系では、GRINレンズ85が単焦点であるため、観察ビームの集光点96の近傍以外では観察ビームのスポット径が大きく、周方向の分解能が低くなる。

図69で示される光走査プローブ20の先端光学系ではSMF225の出射端226からの光は回折レンズ(DOF)227により集光される。回折レンズには1次回折による1次焦点228aと、2次回折による2次焦点228bと、3次回折による3次焦点228c・・・の複数の焦点を有するため、深さ方向の広い範囲にわたって観察ビームのスポット径の小さい状態が維持される。

図70は同様の効果を有する第1の変形例を示す。SMF225の出射端226からの光はフレネルレンズ229により集光される。フレネルレンズ229は多数の円周状のプリズムによりレンズを構成し、第1焦点230aと第2焦点230bを有するよう円周状のレンズが交互に第1焦点230aに集光するプリズム263aと第2焦点230bに集光するプリズム263bより構成されている。

図7 1に同様の効果を有するさらに別の第2の変形例を示す。SMF 2 2 5の出射端2 2 6からの光は集光ミラー2 3 1により集光される。集光ミラー3 1は外周部が曲率が小さな反射面2 3 2 aで構成され、第1焦点2 3 3 aに焦点を結び、内側の面は曲率が大きな反射面2 3 2 bで構成され、第2焦点2 3 3 bに焦点を結ぶ。

図示しないが図6 9と同様の構成を、屈折力の大きなレンズを外周に、屈折力の小さなレンズを内周にと異なるレンズを円周状に配置しても可能である。さらに、図6 5の光軸より上半分を屈折力の大きなレンズで、下上半分を屈折力の小さなレンズで構成しても同様の効果が得られる。

さらに上記の屈折レンズを屈折率分布レンズ（GRIN）で製作することも当然可能である。

また、上記各図では光偏向手段、光走査手段は省いているが、当然本発明の実施例に用いられた光偏向手段、光走査手段を組み合わせる用いることができる。

（効果）

このように本実施例では、第1 2実施例の効果に加え、集光光学系のフォーカス位置以外の深さにおいて、光軸に垂直な方向分解能およびコントラストを向上し、さらに集光位置以外でも高性能が得られるため、被検体に対する位置決めが容易である。

第1 9実施例：

図7 2ないし図7 4は本発明の第1 9実施例に係わり、図7 2は光イメージング装置の光学系の要部の構成を示す構成図、図7 3は図7 2の光学系の第1の変形例を示す図、図7 4は図7 2の光学系の第2の変形例を示す図である。

第1 9実施例は、第1 2実施例とほとんど同じであるので、異なる点のみ説明し、同一の構成には同じ符号をつけ説明は省略する。

（構成・作用）

観察ビームの径を光軸方向に渡って細く保つ方法に、ビームの形状を保って伝搬する非回折ビームの利用が考えられる。非回折ビームは無限のエネルギーを有することから実現不可能であるが、近似的な非回折ビームを生成することは可能である。

そこで、本実施例では、図7 2に示すように、SMF 2 2 5の出射端2 2 6からの光は、出射端からの焦点距離 $f$ に置かれたレンズ3 0 4によって略平行光に変換され、レンズ3 0 4から焦点距離 $f$ 離れた近傍に $\phi d$ の直径を有する環状のスリット3 0 8を

有するマスク 306 が設けられている。

このマスク 306 を透過した光を焦点距離  $f$  離れたところに設けられたレンズ 305 により集光すると、集光ビームは近似非回折ビームとなり、従来の集光でのスポットに対して長い深度 307 で小さなスポットを結ぶ。この範囲に被検体を設けると光軸に垂直な方向も高分解能に観察することができる。

図 73、図 74 に別の例を示す。図 73 に示すように、SMF 225 の出射端 226 からの光は、アキシコン（円錐）レンズ 309 によって集光される。この集光ビームは近似非回折ビームとなり、従来の集光でのスポットに対して長い深度 307 で小さなスポットを結ぶ。この範囲に被検体を設けると光軸に垂直な方向も高分解能に観察することができる。なお、図 74 に示すように円錐の方向が逆であっても同様の効果を有する。

また、このアキシコンレンズを屈折率分布レンズ（GRIN）で製作することで、円柱状に形成することなども可能である。

（効果）

このように本実施例では、第 12 実施例の効果に加え、集光光学系のフォーカス位置以外の深さにおいて、光軸に垂直な方向分解能およびコントラストを向上し、さらに集光位置以外でも高性能が得られるため、被検体に対する位置決めが容易である。

第 20 実施例：

図 75 ないし図 77 は本発明の第 20 実施例に係わり、図 75 は光走査プローブ、光走査手段及び参照光路の光伝播時間変化手段を内視鏡先端部に組込んだ光イメージング装置の構成を示す図、図 76 は図 75 のディスクの構成を示す図、図 77 は図 76 のディスクによる横方向－深さ方向の 2 次元画像を説明する図である。

第 20 実施例は、第 1 実施例とほとんど同じであるので、異なる点のみ説明し、同一の構成には同じ符号をつけ説明は省略する。

（構成・作用）

本実施例は、第 1 実施例の光走査プローブ 20、光走査手段 19 および参照光路の光伝播時間変化手段を内視鏡先端部に組込んだ例であって、図 75 及び図 76 に示すように、内視鏡プローブ先端 243 にはピンホール 253 を有し、ミラー部 252 を有するディスク 241 が内蔵されている。ディスク 241 の中心にはメネジ 251 が設けら

れており、メネジ251は固定されたオネジ244に取り付けられている。ディスク241の外周には外周ギア254が設けられている。外周ギア254はモータ245の駆動軸に取り付けられたピニオンギア246により駆動される。

モータ245が回転すると、外周ギア254が回転し、更に固定されたオネジ244とメネジ251の働きで螺旋運動を行う。ピンホール253の動きはスパイラル状となる。

まず、ファイバ端250から照射された光束255をピンホール253が横切る(図77の横方向の走査)。同時にピンホール253の位置は被検体248から遠ざかるように移動する。複数のピンホール253が複数のスパイラル軌跡を描く。

この内、図77のように、ディスク1回転分の移動量256に従って、光束255を横切る部分だけ切り出すと、X-Z(横方向-深さ方向)の2次元画像を構成できる。内視鏡プローブ243内のファイバ236はSMFを使用するがマルチモードファイバでも構わない。

ピンホール253のディスク241上の位置aと観察点cは共役の位置にある。ダイクロックミラー240の位置bから観察点cまでの距離(bac)と、ダイクロックミラー240の位置bから反射面(bde)までの光路長が同じとなるよう光学系が構成されている。

上記の2つの条件を満たすことにより共焦点の被検体での位置と、コヒーレントゲートによる深さ方向の観察点を一致させながら、観察点を走査することが可能となる。この場合、対物レンズのNAを大きくすることにより高解像を得ることができる。

(効果)

このように本実施例では、一つの走査機構で、横方向と深さ方向(X-Z)の走査が可能となる。

また、共焦点部位と、コヒーレントゲートによる深さ方向の観察点を同時に走査することにより高解像を得ることができる。

なお、光走査プローブに導かれるファイバは一本で良く、また参照ミラーがプローブ先端にあるので、プローブの固体差による光路長の調整はいらない。また、プローブの曲げの影響を受けない。

この発明においては、広い範囲において異なる実施態様が、発明の精神及び範囲か

ら逸脱することなく、この発明に基づいて構成できることは明白である。この発明は、添付のクレームによって限定される以外には、その特定実施態様によって制約されない。



## CLAIMS

1. 被検体に低コヒーレンス光を照射して得られる反射・散乱光によって、前記被検体の断層像を構築するため前記低コヒーレンス光を供給する光源と、

前記光源からの前記低コヒーレンス光を前記被検体に照射すると共に前記被検体からの反射・散乱光を受光し、また受光・照射方向を少なくとも1次元的に走査可能な第1の光走査部を有する光照射受光部と、

前記光照射受光部に前記低コヒーレンス光を前記被検体に導光すると共に前記被検体からの反射・散乱光を導光する第1の光路部と、

低コヒーレンス光を導光する第2の光路部と、

光源と前記第1の光走査部の中途に設けられ前記光源からの前記低コヒーレンス光を第1の光走査部と、第2の光路部に分離する第1の光分離部と、

前記第1の光走査部の中途に設けられ前記被検体からの反射・散乱光を前記第1の光走査部から分離する第2の光分離部と、

前記光分離部により分離された前記低コヒーレンス光を導光する第2の光路部と、

前記第2の光分離部により分離された前記反射散乱光を導光する第3の光路部と、

前記第2の光路部の前記低コヒーレンス光と前記第3の光路部の反射・散乱光を結合して干渉させる結合部と、

前記結合部による干渉を干渉信号として検出する検出部と

前記第2または第3の光路部の一方に設けられ、独立した入射光路および出射光路および前記入射光路および前記出射光路の間に設けられた光透過光学素子により、光路の少なくとも位相遅延量または群遅延量の一方を可変することにより前記干渉位置を光軸に対し軸方向に走査する光路長可変部と、

前記検出部により検出された前記干渉信号を信号処理して前記被検体の断層像を生成する画像生成部と、

を備えたことを特徴とする光イメージング装置。

2. 前記光路長可変部は、前記入射光路からの光の方向を変化させる第2の光走査部と、前記第2の光走査部で選択された方向に応じて光路長が異なる光学要素と

を備えたことを特徴とするクレーム1に記載の光イメージング装置。

3. 前記光路長可変部が導入された光のスペクトルを空間的に分散させるスペクトル分散要素と、

入射光路からスペクトル分散要素に光を導入する光導入部と、

前記スペクトル分散要素で分散させられた光を角振動数に対して略線形に位相を変調させる位相変調器と、前記位相変調素子を介して位相変調をかけられかつ空間的に分散させられた光を1つの光路に統一させるスペクトル統一要素と、統一要素からの光を出射光路に導入する光取出し部とで構成され、

前記これらの構成要素が互いに光学的に接続され、かつ前記位相変調素子の光の角振動数に対する位相変調量の傾きを時間の経過とともに変化させるようにしたことを特徴とするクレーム2に記載の光イメージング装置。

4. 前記光導入部は前記光路長可変部の外部から前記光路長可変部に光を取り入れるための導入用シングルモードファイバーと第1の正レンズで構成され、

前記スペクトル分散要素は第1の回折格子と第2の正レンズのペアで構成され、

前記位相変調器は回転する光透過性素材でできたクサビ形状プリズムで構成され、該クサビ形状プリズムを光の進行方向に対して略平行な方向を軸として回転させるようにしたものであり、

前記スペクトル統一要素は第2の回折格子と第3の正レンズのペアで構成され、

前記光取出し部は第4の正レンズと前記光路長可変部の外へ光を取り出すための取出し用シングルモードファイバーで構成されている

ことを特徴としたクレーム3に記載の光イメージング装置。

5. 前記第3の正レンズと前記第4の正レンズの焦点距離が以下の条件式を満たすことを特徴としたクレーム4に記載の光イメージング装置。

$$NA > f_2 (n-1) \phi / f_4 \quad (\text{条件1})$$

ただし、 $f_2$ は第3の正レンズの焦点距離、 $f_4$ は第4の正レンズの焦点距離、

$n$ はクサビ形状プリズムの屈折率、

$\phi$ はクサビ形状プリズムのクサビの角度、

$NA$ は取出し用シングルモードファイバーの開口数である。

6. 前記第2の回折格子と前記第4の正レンズの間に少なくとも1つのコーンレンズが設けられている

ことを特徴とするクレーム 4 に記載の光イメージング装置。

7. 前記クサビ形状プリズムの回転中心と、光路長可変部を通る光のうちの中心角振動数の光の主光線が通る位置を一致させ、かつ前記参照側経路中またはサンプル側経路中の少なくとも一方に光位相変調器が配置されている

ことを特徴としたクレーム 4 に記載の光イメージング装置。

8. 前記光位相変調器が音響光学素子である

ことを特徴とするクレーム 7 に記載の光イメージング装置。

9. 前記クサビ形状プリズムの回転中心と、光路長可変部を通る光のうち中心角振動数の光の主光線が通る位置をずらすことで、光路長可変部を位相変調器とした

ことを特徴としたクレーム 4 に記載の光イメージング装置。

10. 前記クサビ形状のプリズムがモータの中空の回転軸に設けられ、回転軸の位相を検出または制御する部分を有する

ことを特徴とするクレーム 4 に記載の光イメージング装置。

11. 前記光導入部は光路長可変部の外から光路長可変光学系に光を取り入れるための導入用シングルモードファイバーと第 1 の正レンズで構成され、

前記スペクトル分散要素は第 1 の回折格子と第 2 の正レンズのペアで構成され、

前記位相変調器は、光透過性の液体を少なくとも 2 枚の表面が平らな光透過性の板で挟んだ形状で構成されかつ前記少なくとも 2 枚の光透過性の板の間の角度を時間とともに変化させるものであり、

前記スペクトル統一要素は第 2 の回折格子と第 3 の正レンズのペアで構成され、

前記光取り出し部は第 4 の正レンズと前記光路長可変部の外部へ光を取り出すための取り出し用シングルモードファイバーで構成されている

ことを特徴としたクレーム 3 に記載の光イメージング装置。

12. 前記第 3 の正レンズと前記第 4 の正レンズの焦点距離が以下の条件式を満たすことを特徴としたクレーム 11 に記載の光イメージング装置。

$$NA > f_2 \cdot (n-1) \cdot \Delta\phi_{\max} / (2 \cdot f_4) \quad (\text{条件 4})$$

ただし、 $f_2$  は前記第 3 の正レンズの焦点距離、

$f_4$  は前記第 4 の正レンズの焦点距離、

$n$  は前記光透過性液体の屈折率、

$\Delta \phi_{\max}$ は前記2つの光透過性の板のなす角度の変化量の最大値

NAは取り出し部ファイバーのNA（開口数）である。

13．前記光導入部は前記光路長可変部の外部からこの光路長可変部に光を取り入れるための導入用シングルモードファイバーと第1の正レンズで構成され、

前記スペクトル分散要素は第1の回折格子と第2の正レンズのペアで構成され、

前記位相変調器は、光透過性の液体を少なくとも2枚の表面が平らな光透過性の板で挟んだ形状で構成されかつ前記少なくとも2枚の光透過性の板の間の角度を時間とともに変化させるものであり、

前記スペクトル統一要素は第2の回折格子と第3の正レンズのペアで構成され、

前記光取り出し部は第1軸の方向に正のパワーを持ちかつ前記第1軸に垂直な第2軸の方向にパワーを持たない第4のレンズと、前記第1軸の方向にパワーを持たず前記第2軸の方向に正のパワーを持つ第5のレンズと、光路長可変光学系の外へ光を取り出すための取り出し用シングルモードファイバーで構成されており、

前記第2軸は第1のスペクトル分散要素によって光が空間的に分散させられた方向と垂直な方向である

ことを特徴としたクレーム3に記載の光イメージング装置。

14．前記光導入部は前記光路長可変部の外部からこの光路長可変部に光を取り入れるための導入用シングルモードファイバーと第1の正レンズで構成され、

前記スペクトル分散要素は第1の回折格子と第2の正レンズのペアで構成され、

前記位相変調器は少なくとも1つの光透過性素材でできたクサビ形状プリズムで構成されておりかつ前記クサビ形状プリズムを光のスペクトルが空間的に分散されている方向に略垂直な方向を軸として振動させるものであり、

前記スペクトル統一要素は第2の回折格子と第3の正レンズのペアで構成されている

ことを特徴としたクレーム3に記載の光イメージング装置。

15．前記位相変調器であるクサビ形状プリズムと前記第3の正レンズの間に前記クサビ形状プリズムとクサビの角度と屈折率が同一のクサビ形状プリズムが配置されている

ことを特徴とするクレーム14に記載の光イメージング装置。

16. 前記位相変調器であるクサビ形状プリズムと前記第2の正レンズの間に前記クサビ形状プリズムとクサビの角度と屈折率が同一のクサビ形状プリズムが配置されている

ことを特徴とするクレーム14に記載の光イメージング装置。

17. 前記光取り出し部は第4の正レンズと前記光路長可変部の外部へ光を取り出すための取り出し用シングルモードファイバーで構成されている

ことを特徴としたクレーム14に記載の光イメージング装置。

18. 前記光取り出し部は第1軸の方向に正のパワーを持ちかつ前記第1軸に垂直な第2軸の方向にパワーを持たない第4のレンズと、前記第1軸の方向にパワーを持たず前記第2軸の方向に正のパワーを持つ第5のレンズと、光路長可変部の外へ光を取り出すための取り出し用シングルモードファイバーで構成されており、

前記第2軸は第1のスペクトル分散要素によって光が空間的に分散させられた方向と垂直な方向である

ことを特徴としたクレーム14に記載の光イメージング装置

19. 前記光路長可変部は、光軸に対して平行な光に対し、光軸方向の距離を変化させる

ことを特徴とするクレーム2に記載の光イメージング装置。

20. 前記光路長可変部の光走査部は光ビームの角度を変化させる角度変化部である

ことを特徴とするクレーム2に記載の光イメージング装置。

21. 前記角度変化部はAOD、EOD、ホログラフィックスキャナーのいずれかを含む

ことを特徴とするクレーム20に記載の光イメージング装置。

22. 前記光路長が異なる光学要素はフレネルレンズを含む

ことを特徴とするクレーム2に記載の光イメージング装置。

23. 前記光路長が異なる光学要素が、波長依存収差を有する集光部で、前記光走査部が音響光学素子(AOM)である

ことを特徴とするクレーム2に記載の光イメージング装置。

24. 前記第1の光分離部と第2の光分離部が2入力2出力の4端子の双方向ファイバーカプラで構成され、

前記ファイバーカブラの前記2入力に前記光源と前記第3の光路部が接続され、  
前記ファイバーカブラの前記2出力に第1の光路部と第2の光路部が接続されている

ことを特徴とするクレーム1に記載の光イメージング装置

25. 前記光路長可変部の光学要素は光学レンズと光学距離が異なる階段状の光学ブロックを有する

ことを特徴とするクレーム1に記載の光イメージング装置。

26. 前記光路長可変部の光学素子は移動可能な光学距離が異なる階段状の光学ブロックである

ことを特徴とするクレーム25に記載の光イメージング装置。

27. 前記光学ブロックは前記回転可能なディスクに複数取り付けられている

ことを特徴とするクレーム26に記載の光イメージング装置。

28. 前記光路長可変部は光ビームを細長に変更するビーム形状変更部と円盤に複数の孔の開いた回転可能な可能なディスクを有する

ことを特徴とするクレーム25に記載の光イメージング装置

29. 前記回転可能なディスクは複数のスリットを有する

ことを特徴とするクレーム28に記載の光イメージング装置。

30. 前記回転可能なディスクは複数のピンホールを有する

ことを特徴とするクレーム28に記載の光イメージング装置。

31. 前記光路長可変部が、光平行コリメート部、対向して一体に揺動する分散素子、および光再コリメート部を有する

ことを特徴とするクレーム1に記載の光イメージング装置。

32. 前記対向して一体に揺動する分散素子が平行に設けられた、少なくとも一つの光学定数が同一な回折格子である

ことを特徴とするクレーム31に記載の光イメージング装置

33. 前記分散素子がプリズムである

ことを特徴とするクレーム31に記載の光イメージング装置。

34. 前記分散素子を揺動する揺動部が電磁スキャナである

ことを特徴とするクレーム31に記載の光イメージング装置

35. 前記光平行コリメート部と前記光再コリメート部の間に dispersion compensator が設けられている

ことを特徴とするクレーム31に記載の光イメージング装置。

36. 前記光路長可変部に入射する光の偏光を調整する第1の偏波面調整部と、前記光路長可変部からの出射光の偏光と前記光照射受光部からの戻り光の偏光を調整する第2の偏波面調整部を有する

ことを特徴とするクレーム1に記載の光イメージング装置。

37. 被検体内に挿通可能な柔軟な細長の挿入部と、

低コヒーレンス光源と、

前記挿入部の先端側端面から前記被検体に前記低コヒーレンス光を出射すると共に、前記被検体から反射された反射光を検出するための、シングルモードファイバからなる導光部と、

前記ファイバよりの出射光を前記被検体に集光し、前記被検体からの反射光を検出するため、前記挿入部の先端側に設けられた集光部と、

前記シングルモードファイバから出射した前記低干渉光を走査出射する走査出射部と、

前記シングルモードファイバで検出した反射光と前記光源から生成した基準光とを干渉させる干渉部を有し、

得られた干渉成分の信号を得る光プローブ装置において、

前記走査出射部が、

細長の前記挿入部に設けられた、回転自在な回転シャフトと、

回転シャフト端部に設けられた光反射部と、

挿入部先端部に設けられ、光反射部のプローブの軸方向への可動を規制する規制部を有し、

前記シングルモードファイバと前記集光部が前記回転シャフトと平行に設けられている

ことを特徴とする光プローブ装置。

38. 前記規制部が回転シャフトに設けられているベアリングである

ことを特徴とするクレーム37に記載の光プローブ装置。

39. 前記シングルモードファイバが偏波面保存ファイバ (PMF)

である

ことを特徴とするクレーム37に記載の光プローブ装置。

40. 前記シングルモードファイバの出射端の近傍に前記シングルモードファイバと略平行に、少なくとも一つの光学特性が前記シングルモードファイバと異なる光ファイバが設けられている

ことを特徴とするクレーム37に記載の光プローブ装置。

41. 前記光ファイバがマルチモードファイバである

ことを特徴とするクレーム40に記載の光プローブ装置。

42. 前記光ファイバが前記シングルモードファイバと異なる波長特性を有する

ことを特徴とするクレーム40に記載の光プローブ装置。

43. 前記光ファイバが前記シングルモードファイバと異なる光耐性を有する

ことを特徴とするクレーム40に記載の光プローブ装置。

44. 前記光プローブ装置が、細長の挿入部を有する光プローブと、観測装置本体を有し、

さらに光プローブと観測装置本体との接続コネクタを有し、

そして接続コネクタが、前記シャフトに回転力を伝達する回転接続部と、前記シングルモードファイバを接続する観測光コネクタ部を有する

ことを特徴とするクレーム37に記載の光プローブ装置。

45. 前記光プローブに、少なくとも一つの光学特性が前記シングルモードファイバと異なる光ファイバが設けられ、前記接続コネクタが前記光ファイバ接続部を有する

ことを特徴とするクレーム44に記載の光プローブ装置。

46. 被検体内に挿通可能な柔軟な細長の挿入部と、

低コヒーレンス光源と、

前記挿入部の先端側端面から前記被検体に前記低コヒーレンス光を出射すると共に、前記被検体から反射された反射光を検出するための、シングルモードファイバからなる導光部と、

前記ファイバよりの出射光を前記被検体に集光し、前記被検体からの反射光を検出するため、前記挿入部の先端側に設けられた集光部と、



前記シングルモードファイバから出射した前記低干渉光を走査出射する走査出射部と、

前記シングルモードファイバで検出した反射光と前記光源から生成した基準光とを干渉させる干渉部を有し、前記干渉位置を光軸に対し軸方向に走査するため、その走査範囲に対応した伝搬時間を変化させる伝搬時間変化部と、

干渉光強度を干渉信号として検出する光検出器とを有し、

前記低コヒーレンス光源の照射を制御する光源制御部と、

前記走査出射部の駆動を検知する走査検知部を有し、

前記走査検知部により検知された走査状態に応じて前記光源制御部が駆動されることを特徴とする光イメージング装置。

47．前記走査検知部が前記走査出射部の駆動信号を検知する

ことを特徴とするクレーム46に記載の光イメージング装置。

48．前記光イメージング装置が、前記細長の挿入部を有する光プローブと、観測装置本体を有し、

また前記光プローブと前記観測装置本体との接続コネクタを有し、

前記接続コネクタの接続状態を検知する接続検知部を有し、

前記接続検知部により検知された接続状態に応じて前記光源制御部が駆動されることを特徴とするクレーム4.6に記載の光イメージング装置。

49．前記走査出射部が、前記低コヒーレンス光と異なる波長を有するレーザ光を同時または時分割で挿入部の軸方向に回転走査し、

前記レーザ光の出射を制御するレーザ光出射制御部を有し、

前記走査検知部が前記レーザ光の回転走査状態を検出し、

前記走査検知部により検知された走査状態に応じて前記レーザ光出射制御部が駆動される

ことを特徴とするクレーム46に記載の光イメージング装置。

50．前記走査出射部の回転走査位置を検出する走査位置検出部と、

前記レーザ光の出射位置を入力する出射位置指示部と、

前記レーザ光の出射位置を回転走査位置に対応させる算出部を有し、

算出された回転走査位置でレーザ光の出射制御部を駆動することを特徴とするクレーム 49 に記載の光イメージング装置。

51. 前記挿入部に前記レーザ光を伝送する光ファイバが設けられ、  
前記光ファイバの挿入部端部は、前記低コヒーレンス光を出射する前記シングルモードファイバ端の近傍に設けられ、

前記低コヒーレンス光と、前記レーザ光の出射ビームが略平行であり、  
前記低コヒーレンス光と、前記レーザ光が同一の集光部により集光され  
ことを特徴とするクレーム 50 に記載の光イメージング装置。

52. 前記光イメージング装置が、前記細長の挿入部を有する光プローブと、観測装置本体を有し、

さらに前記光プローブと前記観測装置本体との接続コネクタを有し、  
前記接続コネクタは接続検知部を有し、

前記接続検知部により検知された接続状態に応じて前記レーザ光出射制御部が駆動される

ことを特徴とするクレーム 49 に記載の光イメージング装置。

53. 被検体内に挿通可能な柔軟な細長の挿入部と、  
低コヒーレンス光源と、

前記挿入部の先端側端面から前記被検体に前記低コヒーレンス光を出射すると共に、  
前記被検体から反射された反射光を検出するための、シングルモードファイバからなる導光部と、

前記シングルモードファイバよりの出射光を前記被検体に集光し、前記被検体からの反射光を検出するため、前記挿入部の先端側に設けられた集光部と、

前記シングルモードファイバから出射した前記低干渉光を走査出射する走査出射部と、

前記シングルモードファイバで検出した反射光と前記光源から生成した基準光とを干渉させる干渉部と

を有し、得られた干渉成分の信号を得ることを特徴とする光プローブ装置であって、  
前記挿入部が細い管状部材であるシースを有し、

前記走査出射部が、前記シース内に、前記シングルモードファイバを内蔵した集光

部と出射光偏向部を有する先端光学素子を端部に設けたフレキシブルシャフトを有し、  
前記フレキシブルシャフトを挿入部の軸方向に対して進退し走査を行い、  
前記フレキシブルシャフトの進退を規制する規制部を有する  
ことを特徴とする光プローブ装置。

54. 前記光プローブ装置が、前記細長の挿入部を有する光プローブと、観測装置本体を有し、

さらに前記光プローブと前記観測装置本体との着脱自在な接続コネクタを有し、  
前記フレキシブルシャフトの移動量を限定する規制部が前記光プローブに設けられている

ことを特徴とするクレーム53に記載の光プローブ装置。

55. 前記規制部が、前記フレキシブルシャフト基部に設けられた突起と前記光プローブ基部に設けられた突起を有する

ことを特徴とするクレーム54に記載の光プローブ装置。

56. 被検体内に挿通可能な柔軟な細長の挿入部と、

低コヒーレンス光源と、

前記挿入部の先端側端面から前記被検体に前記低コヒーレンス光を出射すると共に、  
前記被検体から反射された反射光を検出するための、シングルモードファイバからなる  
導光部と、

前記ファイバよりの出射光を前記被検体に集光し、前記被検体からの反射光を検出  
するため、前記挿入部の先端側に設けられた集光部と、

前記シングルモードファイバから出射した前記低干渉光を走査出射する走査出射部  
と、

前記シングルモードファイバで検出した反射光と前記光源から生成した基準光とを  
干渉させる干渉部を有し、得られた干渉成分の信号を得ることを特徴とする光プローブ  
装置であって、

前記挿入部が細い管状部材であるシースを有し、

前記走査出射部が、前記シース内に、前記シングルモードファイバを内蔵した集光  
部と出射光偏向部を有する先端光学素子を端部に設けたフレキシブルシャフトを有し、  
前記フレキシブルシャフトの挿入部の軸方向に対して進退し走査を行い、

前記フレキシブルシャフトを挿入部の軸方向に回転させる回転部を有することを特徴とする光プローブ装置。

57. 前記回転部に軸方向の回転を一定の角度で保持する摩擦部が設けられていることを特徴とするクレーム56に記載の光プローブ装置。

58. 前記光プローブ装置が前記細長の挿入部を有する光プローブと、観測装置を有し、前記回転部が前記観測装置に設けられていることを特徴とするクレーム56に記載の光プローブ装置。

59. 前記光プローブ装置が前記細長の挿入部を有する光プローブと、観測装置を有し、前記回転部が前記光プローブの基端に設けられていることを特徴とするクレーム56に記載の光プローブ装置。

60. 被検体内に挿通可能な柔軟な細長の挿入部と、  
低コヒーレンス光源と、

前記挿入部の先端側端面から前記被検体に前記低コヒーレンス光を出射すると共に、前記被検体から反射された反射光を検出するための、シングルモードファイバからなる導光部と、

前記ファイバよりの出射光を前記被検体に集光し、前記被検体からの反射光を検出するため、前記挿入部の先端側に設けられた集光部と、

前記シングルモードファイバから出射した前記低干渉光を走査出射する走査出射部と、

前記シングルモードファイバで検出した反射光と前記光源から生成した基準光とを干渉させる干渉部を有し、得られた干渉成分の信号を得ることを特徴とする光プローブ装置であつて、

前記挿入部が細い管状部材であるシースを有し、

前記走査出射部が、前記シース内に、前記シングルモードファイバ先端に融着された前記集光部と、前記集光部の一部に設けられた反射面とを有する

ことを特徴とする光プローブ装置。

61. 少なくとも前記シングルモードファイバと前記集光部が前記シース内で一体に回転して走査を行う

ことを特徴とするクレーム60に記載の光プローブ装置。

62. 前記シングルファイバー端がコア拡大処理されている

ことを特徴とするクレーム60に記載の光プローブ装置。

63. 前記集光部が球レンズである

ことを特徴とするクレーム60に記載の光プローブ装置。

64. 前記集光部がGradient index deviceである

ことを特徴とするクレーム60に記載の光プローブ装置。

65. 前記反射面が曲面である

ことを特徴とするクレーム60に記載の光プローブ装置。

66. 前記シングルモードファイバが前記シングルモードファイバ外側にファイバー  
ジャケットを有し、前記ファイバージャケットに減摩耗処理がされている

ことを特徴とするクレーム60に記載の光プローブ装置。

67. 前記シングルモードファイバが前記シングルモードファイバ外側にファイバー  
ジャケットを有し、前記ファイバージャケットに剛性を向上させる処理がされている

ことを特徴とするクレーム60に記載の光プローブ装置。

68. 被検体内に挿通可能な柔軟な細長の挿入部と、

低コヒーレンス光源と、

前記挿入部の先端側端面から前記被検体に前記低コヒーレンス光を出射すると共に、  
前記被検体から反射された反射光を検出するための、シングルモードファイバからなる  
導光部と、

前記ファイバよりの出射光を前記被検体に集光し、前記被検体からの反射光を検出  
するため、前記挿入部の先端側に設けられた集光部と、

前記シングルモードファイバから出射した前記低干渉光を走査出射する走査出射部  
と、

前記シングルモードファイバで検出した反射光と前記光源から生成した基準光とを  
干渉させる干渉部を有し、得られた干渉成分の信号を得ることを特徴とする光プローブ  
装置であって、

前記走査出射部が、前記挿入部に設けられた前記シングルモードファイバからの出  
射光を挿入部の略軸方向に対して周状に偏向する第1の光偏向部と、第1の光偏向部を  
挿入部の略軸方向に回転させる回転駆動部と、

第1の光偏向部に対向して設けられ、第1の光偏向部からの出射光を挿入部の略延長方向に偏向する固定された第2の光偏向部を設けている

ことを特徴とする特徴とする光プローブ装置

69. 被検体に低コヒーレンス光源で生成した低コヒーレンス光を照射し、被検体において散乱した光の情報から被検体の断層像を構築する光イメージング装置であって、  
低コヒーレンス光を被検体に照射し、被検体よりの反射光を受光する光照射受光部と、

光照射受光部と接続し、被検体から戻ってきた低コヒーレンス光と基準光とを干渉させるとともに、前記干渉位置を光軸に対し軸方向に走査するため、その走査範囲に対応した伝搬時間を変化させる伝搬時間変化部と、

干渉光強度を干渉信号として検出する光検出器とを有し、

前記低コヒーレンス光源が、複数の低コヒーレンス光源と、前記複数の低コヒーレンス光源を出力シングルモードファイバに合波するファイバー合波器を有し、

前記低コヒーレンス光源のスペクトル形状が略ガウシアン形状である

ことを特徴とする光イメージング装置。

70. 前記ファイバー合波器がWavelength Dependent Optical Couplerである

ことを特徴とするクレーム69に記載の光イメージング装置。

71. 光源出力と出力シングルモードファイバの間に前記複数の低コヒーレンス光源のスペクトルの少なくとも一部を減衰する光学フィルターが設けられている

ことを特徴とするクレーム69に記載の光イメージング装置。

72. 前記低コヒーレンス光源が、2つの低コヒーレンス光源を有し、

前記ファイバー合波器が、直行する第1の偏光面と第2の偏光面からの光を合波する偏光ビームスプリッタを有し、

第1の低コヒーレンス光源からの低コヒーレンス光が前記偏光ビームスプリッタの第1の偏光面に、第1の偏光面と一致する偏光で入射し、第2の低コヒーレンス光源からの低コヒーレンス光が前記偏光ビームスプリッタの第2の偏光面に第2の偏光面と一致する偏光で入射し、その合波を前記出力シングルモードファイバに得る

ことを特徴とするクレーム69に記載の光イメージング装置。

73. 被検体に低コヒーレンス光を照射し、被検体において散乱した光の情報から被検体の断層像を構築する光イメージング装置であって、

低コヒーレンス光を被検体に照射し、被検体よりの反射光を受光する光照射受光部と、

光照射受光部と接続し、被検体から戻ってきた低コヒーレンス光と基準光とを干渉させるとともに、前記干渉位置を光軸に対し軸方向に走査するため、その走査範囲に対応した伝搬時間を変化させる伝搬時間変化部と、

干渉光強度を干渉信号として検出する光検出器とを有し、

前記光照射受光部に低コヒーレンス光を被検体に対して集光する集光部を有し、前記集光部が複数の焦点を有する

ことを特徴とする光イメージング装置。

74. 前記集光部が回折素子を有し、前記複数の焦点は前記回折格子の1次回折光に対応する焦点および高次回折光に対応する焦点である

ことを特徴とするクレーム73に記載の光イメージング装置。

75. 前記集光部が前記複数の焦点それぞれに対応する複数の面を有する屈折レンズを有する

ことを特徴とするクレーム73に記載の光イメージング装置。

76. 前記屈折レンズがフレネルレンズである

ことを特徴とするクレーム75に記載の光イメージング装置。

77. 前記屈折レンズが中心部と周辺部が異なる焦点を有している

ことを特徴とするクレーム75に記載の光イメージング装置。

78. 前記屈折レンズが異なる焦点のレンズに分割される

ことを特徴とするクレーム75に記載の光イメージング装置。

79. 前記集光部が前記複数の焦点それぞれに対応する複数の面を有する集光ミラーである

ことを特徴とするクレーム73に記載の光イメージング装置。

80. 被検体に低コヒーレンス光を照射し、被検体において散乱した光の情報から被検体の断層像を構築する光イメージング装置であって、

低コヒーレンス光を被検体に照射し、被検体よりの反射光を受光する光照射受光部

と、

前記光照射受光部と接続し、被検体から戻ってきた低コヒーレンス光と基準光とを干渉させるとともに、前記干渉位置を光軸に対し軸方向に走査するため、その走査範囲に対応した伝搬時間を変化させる伝搬時間変化部と、

干渉光強度を干渉信号として検出する光検出器とを有し、

前記光照射受光部に低コヒーレンス光を被検体に対して集光する集光部を有し、

前記集光部が、quasi non-diffracting beam 生成部を有する

ことを特徴とする光イメージング装置。

81. 前記 quasi non-diffracting beam生成部が、アキシコンレンズ（円錐レンズ）を有する

ことを特徴とするクレーム80に記載の光イメージング装置。



## ABSTRACT OF THE DISCLOSURE

高SNで高速なリファレンス走査手段を有すると共に、干渉系を安価に構成する。

低コヒーレンス光が光カプラから光カプラを経由し光走査プローブを通り、生体組織の観察点から反射され再び光カプラに戻り、第4のSMFを通り光カプラに至る光路の光遅延時間と、光カプラから光路長可変光学系を経由し光カプラに至る光路の光遅延時間の差に対応する光路長差がコヒーレント長以内になると干渉を生じる。その干渉信号をディテクタ、差動アンプ、復調器、ADコンバータによりコンピュータに取り込む。